



**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**SIMULACIÓN DE UN CHOQUE
LATERAL CON *DUMMY* SIN
CINTURÓN MEDIANTE LS-DYNA**

PROYECTO FIN DE CARRERA

Ingeniería Técnica Industrial: Mecánica

Autores:

D. JESÚS SÁNCHEZ AGUILERA

Tutora:

Dra. D^a. BEATRIZ LÓPEZ BOADA

OCTUBRE 2011

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	10
1.1.	OBJETIVO	11
1.2.	ESTRUCTURA DEL PROYECTO	12
2	SISTEMAS DE SEGURIDAD ACTIVA.....	14
2.1.	FRENOS.....	14
2.2.	NEUMÁTICOS	16
2.3.	LUCES.....	17
2.4.	DIRECCIÓN.....	18
2.5.	<i>ADAPTIVE CRUISE CONTROL</i>	18
2.6.	CONTROL DE ESTABILIDAD: ESP.....	20
2.7.	CONTROL DE TRACCIÓN: EDS /TCS	23
3	SEGURIDAD PASIVA.....	24
3.1.	DEFORMACIÓN PROGRAMADA.....	24
3.2.	EL HABITACULO DE SEGURIDAD.....	27
3.3.	CINTURÓN DE SEGURIDAD.....	28
3.3.1.	CINTURÓN DE DOS PUNTOS.....	29
3.3.2.	CINTURÓN DE TRES PUNTOS.....	30
3.4.	AIRBAG.....	32
3.4.1.	AIRBAG FRONTAL.....	33
3.4.2.	AIRBAG LATERAL.....	34
3.4.3.	AIRBAG DE CORTINA.....	34
3.5.	REPOSACABEZAS.....	35
3.6.	ESPEJOS RETROVISORES ABATIBLES	36
4	ENSAYOS DE CHOQUES	37
4.1.	HISTORIA DE LOS <i>CRASH TEST</i>	39
4.2.	ASOCIACIONES.....	42
4.3.	HISTORIA DEL <i>DUMMY</i>	43
4.4.	PRUEBAS DE CHOQUE.....	47
4.5.	TIPOS DE PRUEBAS DE CHOQUE.....	47

4.5.1.	IMPACTO FRONTAL	48
4.5.1.1	IMPACTO FRONTAL CONTRA UNA BARRERA RÍGIDA.....	49
4.5.1.2	IMPACTO FRONTAL CONTRA UN POSTE.....	49
4.5.2.	IMPACTO LATERAL.....	49
4.5.2.1.	IMPACTO LATERAL CONTRA OTRO VEHÍCULO.....	50
4.5.2.2.	IMPACTO LATERAL CONTRA UN POSTE	51
4.5.3.	VUELCO.....	51
4.5.4.	IMPACTO TRASERO.....	53
4.5.5.	PRUEBAS CON SILLITAS	53
5	EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.....	54
5.1.	PRINCIPIOS BÁSICOS Y APLICACIONES	56
5.2.	PROBLEMAS NO LINEALES	57
5.3.	LS-DYNA.....	58
6	REGLAMENTO 95.....	61
6.1.	PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE COLISIÓN	61
6.1.1.	TERRENO DE ENSAYO	61
6.1.2.	CONDICIONES DE ENSAYO	62
6.1.3.	CARACTERÍSTICAS DE LA BARRERA DEFORMABLE	62
6.2.	CÁLCULO DEL <i>HIC</i> (<i>HEAD INJURY CRITERION</i>).....	62
7	MODELOS EMPLEADOS EN LA SIMULACIÓN	65
7.1.	EI VEHICULO	66
7.1.1.	GEOMETRÍA.....	67
7.1.2.	MATERIALES.....	67
7.1.3.	GRAVEDAD.....	68
7.1.4.	ASIENTOS	68
7.1.5.	ACELERÓMETROS	69
7.2.	<i>BOGIE</i>	69
7.2.1.	GEOMETRÍA.....	71
7.2.2.	MATERIALES.....	72
7.2.3.	VELOCIDAD.....	73
7.2.4.	GRAVEDAD.....	73

7.2.5.	ACELERÓMETROS	73
7.3.	DUMMY	73
7.3.1.	GEOMETRÍA	74
7.3.2.	MATERIALES	75
7.3.3.	GRAVEDAD	76
7.3.4.	ACELERÓMETROS	76
7.4.	REGIONES DE CONTACTO	77
7.4.1.	CONTACTOS DEFINIDOS EN EL COCHE	78
7.4.2.	CONTACTOS DEFINIDOS EN EL DUMMY	78
7.4.3.	CONTACTOS DEFINIDOS EN EL BOGIE	79
7.4.4.	CONTACTOS DEFINIDOS ENTRE EL COCHE Y EL BOGIE	79
7.4.5.	CONTACTOS DEFINIDOS ENTRE EL COCHE Y EL DUMMY	80
7.4.6.	CONTACTOS DEFINIDOS ENTRE EL COCHE Y EL BOGIE CON EL SUELO	81
8	RESULTADOS	82
8.1.	CASO: ENSAYO DE CHOQUE LATERAL CON UN DUMMY SIN CINTURÓN.	83
8.2.	COMPARACIÓN ENTRE UN CASO SIN CINTURÓN Y OTRO CON CINTURÓN	90
9	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	93
9.1.	CONCLUSIONES	93
9.2.	TRABAJOS FUTUROS	94
10	REFERENCIAS	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Gravedad de los heridos en choques laterales.....	8
Figura 1. 2 <i>Side Crash test</i> mediante Ls-PrePost.....	9
Figura 2. 1 Localización de los sensores del ABS y la unidad de control.....	12
Figura 2. 2 No existen obstáculos por delante: El ACC mantiene la velocidad prefijada.....	16
Figura 2. 3 Aparece un vehículo interponiéndose por delante: El ACC frena el vehículo para mantenerlo a la distancia de seguridad prefijada.....	16
Figura 2. 4 Al cambiar de carril, este queda de nuevo libre: El ACC acelera el vehículo hasta alcanzar de nuevo la velocidad prefijada.....	16
Figura 2. 5 Efecto del ESP en condiciones de subviraje.....	18
Figura 2. 6 Efecto del ESP en condiciones de sobreviraje.....	19
Figura 3. 1 Comparación entre un vehículo con deformación programada y otro sin deformación programada.....	22
Figura 3. 2 Zonas con diferentes aceros.....	23
Figura 3. 3 Habitáculo de seguridad.....	24
Figura 3. 4 Cinturón de dos puntos.....	26
Figura 3. 5 Cinturón de tres puntos.....	27
Figura 3. 6 Cinturón de cuatro y cinco puntos.....	28
Figura 3. 7 Carrete Inercial.....	28
Figura 3. 8 Pretensor mecánico.....	29
Figura 3. 9 Pretensor pirotécnico.....	29
Figura 3. 10 Funcionamiento del airbag.....	30
Figura 3. 11 Airbag Lateral.....	31
Figura 3. 12 Airbag de cortina.....	33
Figura 3. 13 Reposacabezas activo.....	33

Figura 4. 1 Estado de un coche tras ser sometido a un crash test.....	36
Figura 4. 2 Simulación por ordenador de un choque.....	36
Figura 4. 3 Secuencia de un crash test de un atropello.....	40
Figura 4. 4 <i>Dummy</i> Infantil.....	41
Figura 4. 5 <i>Hybrid I</i>	42
Figura 4. 6 <i>Hybrid II</i> y <i>Hybrid III</i>	43
Figura 4. 7 <i>Hybrid III</i> y <i>EuroSID-II</i>	44
Figura 4. 8 Familia <i>dummy Hybrid III</i>	45
Figura 4. 9 Impacto Frontal.....	46
Figura 4. 10 Estado de un coche tras sufrir un choque frontal.....	46
Figura 4. 11 Choque frontal contra un poste.....	47
Figura 4. 12 Choque lateral según EuroNCAP.....	48
Figura 4. 13 Estado de un coche tras sufrir un choque lateral.....	48
Figura 4. 14 Ensayo lateral contra un poste.....	49
Figura 4. 15 Estado de un coche tras sufrir un ensayo de vuelco.....	50
Figura 4. 16 Diferentes ensayos de vuelco.....	50
Figura 4. 17 Alcance trasero.....	51
Figura 4. 18 Ensayo de una sillita para niños.....	51
Figura 5. 1 Curva-tensión deformación del acero.....	55
Figura 5. 2 Choque simulado por ordenador.....	57
Figura 5. 3 <i>Dummy</i> simulado por ordenador con cinturón.....	58
Figura 5. 4 Airbag creado con Ls-PrePost.....	58
Figura 5. 5 Gráfica hallada mediante Ls-PrePost.....	59
Figura 6. 1 Gráfica del riesgo de lesión cerebral con AIS ≥ 4	63
Figura 7. 1 Imagen del vehículo utilizado en la simulación.....	66

Figura 7. 2 Asientos del Ford Taurus.....	68
Figura 7. 3 Vehículo con los asientos incluidos.....	69
Figura 7. 4 <i>Bogie</i> inicial.....	69
Figura 7. 5 Impactador escalado.....	71
Figura 7. 6 Imagen final del <i>bogie</i>	72
Figura 7. 7 <i>Dummy</i> utilizado en la simulación.....	74
Figura 7. 8 Vista frontal del <i>dummy</i> utilizado en la simulación.....	75
Figura 7. 9 <i>Dummy</i> con todos sus acelerómetros.	77
Figura 7. 10 Curva contacto asientos.....	80
Figura 8. 1 Velocidad de la cabeza del dummy.....	88
Figura 8. 2 Aceleración de la cabeza del dummy.	89
Figura 8. 3 Gráfica del HIC.....	90
Figura 8. 4 Aceleración de la cabeza del dummy con cinturón de seguridad....	91
Figura 8. 5 Aceleración de la cabeza del dummy sin cinturón de seguridad....	91
Figura 9. 1 Ensayo contra un poste.....	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 6. 1 Nivel de conmoción cerebral según el HIC.....	63
Tabla 6. 2 Nivel de daño craneal según el HIC.....	63
Tabla 7. 1Criterio de unidades	66
Tabla 7. 2 Datos del vehículo.....	67
Tabla 7. 3 Valores del material PIECEWISE LINEAR PLASTICITY	67
Tabla 7. 4 Propiedades del material RIGID	70
Tabla 7. 5 Propiedades del material HONEYCOMB.....	70
Tabla 7. 6 Dimensiones <i>bogie</i>	71
Tabla 7. 7 Propiedades del material ELASTIC.....	72
Tabla 7. 8 Propiedades del material	75
Tabla 7. 9 Propiedades del material RIGID.....	76
Tabla 7. 10 Propiedades del material ELASTIC.....	76
Tabla 8. 1 Secuencia del choque desde el exterior.....	83
Tabla 8. 2 Secuencia del choque vista desde el interior del vehículo.....	86

1 INTRODUCCIÓN

Atendiendo al anuario estadístico publicado por la DGT se puede advertir una reducción de los accidentes de tipo lateral llegando a su nivel mínimo en el año 2008 con un total de 7101 accidentes [1].

En el año 2009 se observa un leve crecimiento de los choques laterales. Los accidentes en el año 2009 cuando los vehículos se encuentra en marcha son 48.852 accidentes de los cuales 7167 son colisiones totalmente laterales, es decir un 14.67%. De estos 7167 choques, sólo el 0.78% son mortales. En la figura 1.1 se puede apreciar cómo se distribuye las víctimas en función de su gravedad.

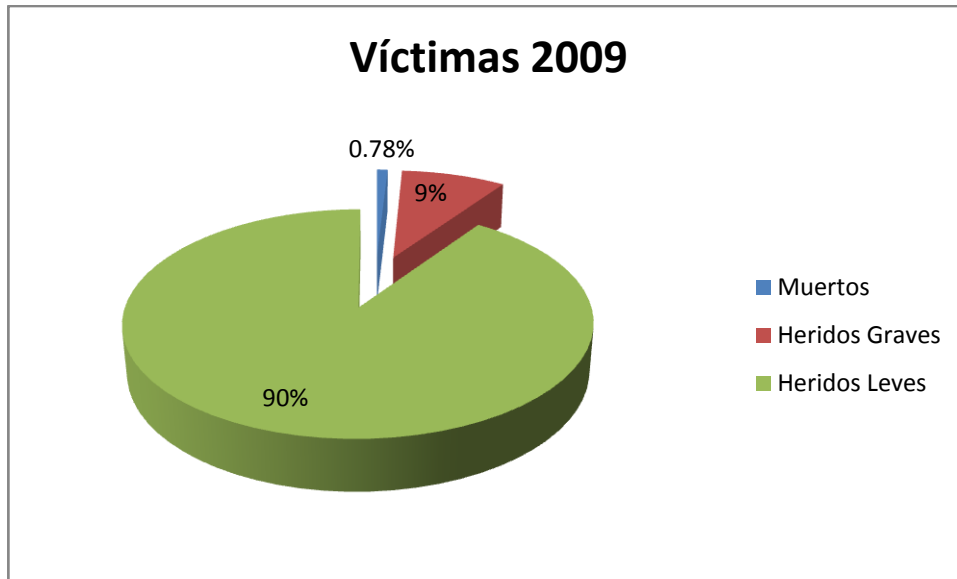


Figura 1. 1 Gravedad de los heridos en choques laterales.

El proyecto se centrará sobre el estudio de este tipo de accidentes mediante la simulación de un choque lateral gracias al cálculo por ordenador. Este tipo de simulaciones son ampliamente realizadas para conocer el comportamiento del vehículo en determinadas situaciones.

Estos ensayos por ordenador no han reemplazado a los ensayos físicos realizados a los vehículos, debido a que los ensayos físicos se evalúan con mayor precisión el grado de deformación del vehículo y también qué lesiones produce sobre los ocupantes del vehículo.

En este proyecto se utilizan dos programas informáticos para realizar la simulación del choque lateral. El programa utilizado para implementar el modelo y observar los datos es Ls-PrePost. El programa para llevar a cabo la simulación del choque es LS-Dyna. Los dos programas han sido realizados por la compañía estadounidense Livermore Software Technology Corporation (LSTC) [2].

1.1. OBJETIVO

El objetivo de este proyecto es analizar un modelo tridimensional de simulación del impacto lateral entre dos vehículos con diferentes condiciones iniciales mediante el uso de los programas Ls-PrePost y Ls-Dyna. El estudio se focaliza en la homologación de vehículos automóviles según el reglamento 95 de la Unión Europea. Para ello se medirán diferentes parámetros en el *dummy*. Los valores de la simulación del caso con cinturón se podrán comparar gracias a los

datos suministrados en el proyecto "Simulación de un choque lateral con *dummy* con cinturón mediante Ls-Dyna" [3].

Debido a la complejidad de ambos programas informático, la simulación del choque es bastante sencilla, queriendo representar las características más generales del suceso. Ls-Dyna tiene en cuenta una gran cantidad de fenómenos para las simulaciones: comportamiento no lineal, algoritmos de contacto, fricción, transferencias de calor entre partes, etc. En la figura 1.2 se observa una demostración de estos dos programas.

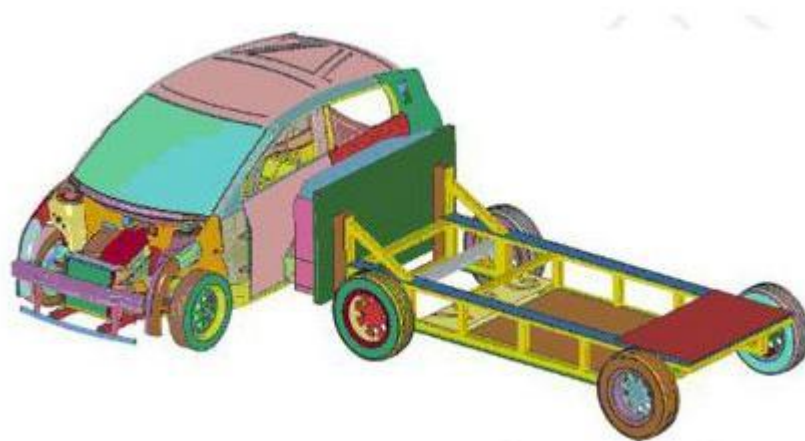


Figura 1. 2 Side Crash test mediante Ls-PrePost.

Por lo tanto no es objeto de este proyecto entrar en detalle de ninguno de los procesos que participan en la simulación. Todos los modelos empleados en la simulación han sido desarrollados por la NCAC y descargados de su propia página web [4].

1.2. ESTRUCTURA DEL PROYECTO

El proyecto está dividido en varios capítulos, los capítulos son descritos a continuación.

En el capítulo segundo, ELEMENTOS DE SEGURIDAD ACTIVA, se describen los sistemas de seguridad activa. Los sistemas de seguridad activa son aquellos que tratan de impedir el accidente antes de que se produzca como el ABS, el ESP, el ACC, el BAS...

En el capítulo tercero, ELEMENTOS DE SEGURIDAD PASIVA, trata sobre los sistemas de seguridad pasiva. Los sistemas de seguridad pasiva se centran en minimizar el daño una vez que el accidente se ha producido. En este capítulo se tratará en profundidad la carrocería, habitáculo de seguridad, cinturón de seguridad y otros sistemas.

En el capítulo cuarto, ENSAYOS DE CHOQUE, versa sobre los diferentes ensayos de choque. En este capítulo se describe la historia y la evolución de los *crash tests*, los diferentes *crash tests* que se realizan y las diferentes empresas que los llevan a cabo.

En el capítulo quinto, EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS, se hace una introducción al método de los elementos finitos en el cual se basan los programas empleados en la simulación, Ls-PrePost y Ls-Dyna.

En el capítulo sexto, REGLAMENTO 95, aprobado el 18 de Julio de 2005 por el consejo de la unión europea, trata sobre el proceso de homologación en torno a los choques laterales entre dos vehículos. Dentro del reglamento también se trata sobre los criterios de evaluación de lesiones.

En el capítulo séptimo, PROCESO DE IMPLEMENTACIÓN, versa sobre el proceso por el cual se ha simulado todo el choque lateral entre los vehículos mediante el programa Ls-PrePost, como el tipo de contacto utilizado para cada caso, como se le ha asignado la velocidad al *bogie*, etc.

En el capítulo octavo, RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES, se comentan los resultados obtenidos de la simulación. Por último se hará una comparación entre los valores obtenidos en una simulación con cinturón o sin cinturón y los efectos que producen estos valores.

En el capítulo noveno, CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS, se extraen las conclusiones a las que se ha llegado al finalizar el proyecto, también se explicarán los posibles trabajos futuros que se podrán realizar apoyándose en éste y otros proyectos realizados en la Universidad Carlos III de Madrid.

2 SISTEMAS DE **SEGURIDAD** **ACTIVA**

La seguridad vial consiste en la prevención de accidentes de tránsito o la minimización de sus efectos cuando tiene lugar un suceso no deseado. La seguridad vial la podemos dividir entre seguridad activa y seguridad pasiva [5].

La seguridad activa es aquella que su misión es prevenir el accidente antes de que se produzca. Está diseñada para garantizar el buen funcionamiento de un vehículo en movimiento y responder a las órdenes del conductor. Algunos sistemas de seguridad activa son los siguientes:

2.1. FRENOS

Los frenos son los elementos que se encargan de generar las fuerzas para que el vehículo se detenga, por lo que siempre tienen que estar en buen estado. Los frenos son los elementos que más se ha desarrollado en estos años junto con los sistemas de ayuda a la frenada [6].

Los sistemas de ayuda a la frenada son los siguientes:

• **ABS:** El ABS es un dispositivo de ayuda en la conducción que evita el bloqueo de las ruedas durante la frenada. El ABS son las siglas de *Anti-lock Braking System*, mejora sensiblemente la seguridad dinámica de los coches, ya que reduce la posibilidad de pérdida de control del vehículo en situaciones extremas, permite mantener el control sobre la dirección y además permite detener el vehículo en menos metros, aumentando la seguridad y reduciendo el riesgo de colisión, y así consiguiendo evitar el obstáculo. En la figura 2.1 se puede observar donde se encuentra los sensores del ABS y la unidad de control.

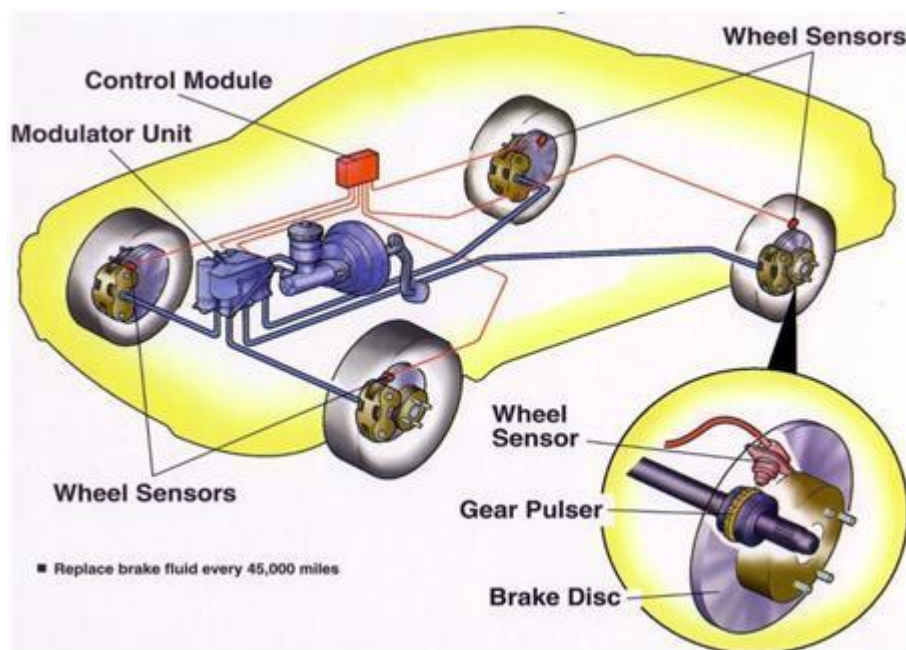


Figura 2. 1 Localización de los sensores del ABS y la unidad de control.

El ABS tiene como función adaptar el nivel de presión del líquido de freno en cada rueda con el fin de evitar el bloqueo y optimizar así el compromiso de:

- Estabilidad en la conducción: Durante el proceso de frenado debe garantizarse la estabilidad del vehículo, tanto cuando la presión de frenado aumenta lentamente hasta el límite de bloqueo como cuando lo hace bruscamente, es decir, frenando en situación límite.
- Control del vehículo: El vehículo puede conducirse al frenar en una curva aunque pierdan adherencia algunas de las ruedas.

- Distancia de la parada: Es decir acortar la distancia de parada lo máximo posible.

• **BAS:** El BAS son las siglas de *Brake Assist System*, dispositivo originalmente fabricado por TRW/Lucas que estrenó en 1996 el Mercedes Clase S y que básicamente se trata de una función añadida al Sistema Antibloqueo de frenada.

Se trata de un dispositivo que, ante una frenada de emergencia, es capaz de aprovechar de forma automática la máxima potencia de frenada del vehículo y además, activa el *warning*. Se desconecta por sí solo cuando el conductor suelta el pedal de freno por completo.

• **EBD:** El EBD son las siglas de *Electronic Brakeforce Distribution* o reparto electrónico de frenada. Los sistemas de frenos antibloqueo de cuatro canales permite adoptar una lógica de control que distribuye electrónicamente la fuerza de frenado entre el eje delantero y el eje trasero. Este reparto de fuerza frenante se utiliza para compensar el estado de carga del vehículo y la transferencia de masas que existe entre los ejes delantero y trasero al frenar. En los sistemas de frenos convencionales, esta función recae en los correctores mecánicos de presión hidráulica colocados cerca del eje trasero. Pero el funcionamiento de estos correctores mecánicos simplemente consigue acercarse a la distribución ideal de la frenada. Por el contrario, la distribución electrónica de la frenada consigue casi igualar a la distribución ideal al mantener la presión hidráulica del circuito sobre las pinzas de los frenos traseros de forma activa.

2.2. NEUMÁTICOS

Los neumáticos son el elemento de contacto entre el vehículo y la carretera. Un neumático en mal estado se traduce como una mala conexión con el medio [7].

También existen sistemas de ayuda en el control de presión de los neumáticos. Este sistema sirve para vigilar continuamente la presión de los neumáticos durante la marcha y estando el vehículo parado.

Asiste en todo momento al conductor en la función de mantener controladas las presiones que ha puesto en los neumáticos y emite los avisos correspondientes en el cuadro de instrumentos del vehículo al producirse una pérdida de presión en cualquiera de ellos. La unidad de control para vigilancia de la presión de los neumáticos y sus fluctuaciones, transmite los mensajes correspondientes del sistema al cuadro de instrumentos.

La información que transmite es la siguiente:

- Pérdidas lentas de presión: Un 85% de los "reventones" de neumáticos se deben a pérdidas lentas de presión. La causa del reventón reside en un calentamiento excesivo debido a un trabajo de sobreflexión al circular a alta velocidad con una presión de inflado demasiado baja.
- Pérdidas repentinas de presión: En este caso, el conductor se da cuenta inmediatamente de este fenómeno a través de las reacciones extrañas que muestra el vehículo.

2.3. LUCES

El sistema de alumbrado es el conjunto de todos y cada uno de los dispositivos que advierten de la presencia. La marca BMW ha desarrollado unos sistemas de ayuda a la conducción, en el sistema de la iluminación.

En carretera, las luces autoadaptables se mueven solidariamente con la dirección para iluminar allá a donde nos estemos moviendo. Los sensores que miden el ángulo de giro, también detectan el movimiento vertical y la velocidad.

A más velocidad, los faros de xenón se elevan para aumentar la visibilidad, eso sí teniendo en cuenta no deslumbrar a los conductores que circula en sentido contrario. Ese mismo movimiento de elevación ocurre cuando comenzamos a ascender y que se invierte a la hora de descender, consiguiendo así una buena forma de no deslumbrar en los cambios de rasante.

El BMW Night Vision permite detectar objetos que se sitúan a una distancia de hasta 500 metros mediante una cámara infrarroja. La información se traslada a una pantalla de control mostrando a los objetos-peatones en amarillo. Cuando el sistema detecta un peligro, informa al conductor mediante un aviso adicional [8].

El Side View permite ofrece mayor visibilidad en el tráfico lateral. Dos cámaras en ambos lados del paragolpes frontal permiten recibir información al momento en el display de control de todo lo que sucede cerca del automóvil. Desde el tráfico hasta las estrecheces del aparcamiento. Un sistema que puede eliminar casi completamente el punto muerto del coche.

2.4. DIRECCIÓN

En estos años, la dirección de los coches ha recibido un importante impulso. Se ha generalizado la llamada dirección asistida, reduce la fuerza necesaria para girar el volante, y se ha perfeccionado con la llegada del servotronic, que endurece la dirección con el aumento de velocidad, otro avance existente es la llamada dirección activa, la cual provoca diferentes grados de giro según la velocidad del automóvil. Hoy, se abre paso la dirección con asistencia eléctrica, suave pero sin perder seguridad según se incrementa la velocidad, consiguiendo de una manera mucho más sencilla el endurecimiento de la dirección según la velocidad y con un menor consumo energético.

2.5. *ADAPTIVE CRUISE CONTROL*

El Control de Velocidad de Crucero Adaptativo también regula la velocidad a la que se desea circular de forma automática. La novedad reside en qué además, mide la distancia de circulación con respecto al vehículo procedente, frenando nuestro vehículo si es necesario para mantener dicha distancia de seguridad [9].

El ACC visualiza el entorno por delante de nuestro vehículo y si, en un momento dado detecta la presencia de otro vehículo circulando por delante a una velocidad inferior, automáticamente alerta al conductor del peligro por una aproximación excesiva y reduce la velocidad de nuestro vehículo actuando sobre el sistema de frenos, de forma que se mantiene la distancia de seguridad que haya sido predeterminada. Una vez que el carril por el que circulamos queda libre, el ACC acelera el vehículo hasta la velocidad que se haya programado. En las siguientes figuras (Figura 2.2, Figura 2.3, Figura 2.3) se explica el modo de funcionamiento del ACC:



Figura 2. 2 No existen obstáculos por delante: El ACC mantiene la velocidad prefijada.



Figura 2. 3 Aparece un vehículo interponiéndose por delante: El ACC frena el vehículo para mantenerlo a la distancia de seguridad prefijada.

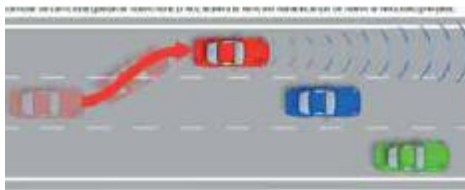


Figura 2. 4 Al cambiar de carril, este queda de nuevo libre: El ACC acelera el vehículo hasta alcanzar de nuevo la velocidad prefijada.

Desde el punto de vista de la seguridad vial el sistema ACC resulta especialmente útil en aquellas colisiones por alcance debidas a la falta de atención del conductor.

En particular, el sistema ACC:

- Ayuda a la conducción en situaciones de tráfico denso.
- Ayuda al conductor en las funciones elementales de aceleración y frenada durante la conducción a velocidad de crucero.
- Mantiene la distancia de seguridad asignada de forma automática.
- Constituye una piedra angular en los sistemas avanzados de seguridad en los vehículos.

2.6. CONTROL DE ESTABILIDAD: ESP

ESP son las siglas en alemán de "*Elektronisches Stabilitätsprogramm*"; el nombre genérico que usamos para este sistema es "control de estabilidad". Las siglas con que se nombra al control de estabilidad pueden variar según la marca.

En todo caso, el objetivo del control de estabilidad es el mismo: hacer que el coche permanezca en la trayectoria deseada por el conductor cuando hay condiciones que podrían impedirlo. El control de estabilidad es, por tanto, una ayuda al conductor.

La eficacia del control de estabilidad está limitada por la velocidad del coche y la adherencia disponible; si la velocidad pasa de un cierto límite para la adherencia dada, el control de estabilidad no puede hacer nada.

Por ejemplo, el control de estabilidad es inútil mientras el coche hace "*aquaplaning*", porque ahí no hay contacto entre las ruedas y el suelo. Si pierde la trayectoria por esa causa, el control de estabilidad no es útil hasta que el neumático vuelve a tener contacto con el suelo (y en ese momento, puede ser una ayuda muy grande).

Hay dos efectos posibles cuando el coche se aparta de la trayectoria deseada: subviraje y sobreviraje.

El subviraje se produce cuando, por ejemplo, el conductor se encuentra trazando una curva y encuentra que se cierra inesperadamente, cuando debe esquivar un obstáculo o cuando circula por curvas con suelo resbaladizo. Si hay subviraje, lo que ocurre es que el coche no gira lo suficiente para tomar la curva y se sale por el exterior, o incluso que sigue una trayectoria completamente recta (con o sin giro del coche sobre su eje vertical).

La otra posible pérdida de trayectoria es el sobreviraje. En algunos casos, el sobreviraje ocurre después del subviraje, cuando el coche vuelve a tener la capacidad de giro que había perdido y el conductor tiene la dirección muy girada. También se puede sobrevirar, por ejemplo, si se circula a gran velocidad en curva y el conductor desacelera, o en curvas enlazadas donde se crea un movimiento consecutivo del balanceo en la carrocería.

Lo que hace el ESP es añadir giro cuando el coche subvira, y limitar el giro cuando sobrevira. En el primer caso, si el coche pisa una superficie resbaladiza y

tiende a salirse de la carretera, el control de estabilidad tratará de que el coche gire y se mantenga dentro de ella. En segundo caso, si el coche comienza a dar un giro brusco sobre sí mismo, el control de estabilidad detiene ese giro y hace que el coche tienda a seguir la dirección de las ruedas delanteras.

El control de estabilidad resulta especialmente eficaz en manos de conductores que lo tengan como un seguro en caso de error o circunstancias imprevisibles.

Una trayectoria curva resulta de dos factores: uno, el coche tiene un movimiento que lo induce a seguir con la misma dirección, sentido y velocidad que lleva. Dos, una fuerza hace que el coche cambie de dirección y tienda a ir hacia el centro de la curva que describe.

La interacción de esos dos factores da una cierta trayectoria curva. De hecho, lo que hace el conductor al girar el volante es crear esa fuerza centrípeta que desvía el coche de la dirección que lleva. La trayectoria real del coche puede no coincidir con la curva que desea trazar el conductor por dos causas:

- Subviraje: La cantidad de movimiento es excesiva o la fuerza centrípeta insuficiente. En ese caso, la trayectoria real es una curva más abierta de lo necesario. Puede ocurrir incluso que sea imposible crear una fuerza centrípeta suficiente para que el coche cambie sustancialmente de dirección. En ese caso, el eje vertical del coche continúa su trayectoria en línea recta, con independencia que se produzca o no un giro alrededor de ese eje. Es decir, es posible que un coche gire sobre sí mismo pero que el eje de ese giro siga una línea recta. En la figura 2.5 se puede observar el efecto del ESP en condiciones de subviraje.

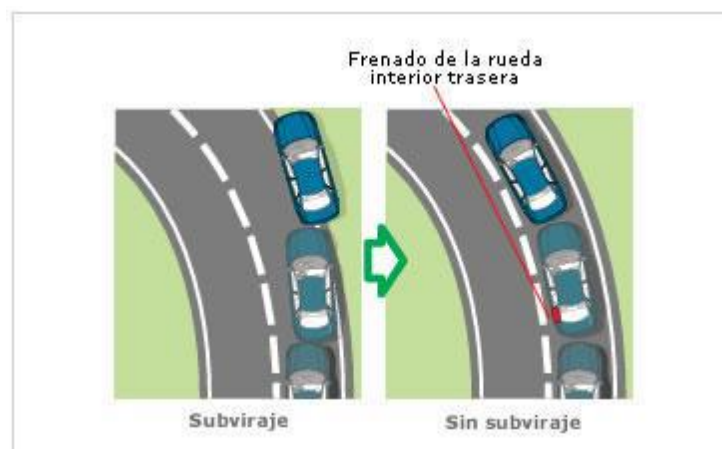


Figura 2. 5 Efecto del ESP en condiciones de subviraje.

- **Sobreviraje:** La cantidad de movimiento es insuficiente o la fuerza centrípeta excesiva. En ese caso, la trayectoria real es una curva más cerrada de lo necesario. Puede ocurrir que, en un primer momento, la inercia sea suficiente para la fuerza centrípeta creada. Si, entonces, el coche pierde cantidad de movimiento (por ejemplo, porque el conductor desacelera), la fuerza centrípeta resulta excesiva y sobrevira. En la figura 2.6 se muestra el efecto del ESP.



Figura 2. 6 Efecto del ESP en condiciones de sobreviraje.

Si se produce un sobreviraje, el control de estabilidad frena la rueda delantera exterior a la curva. De esa manera se limita ese giro hasta dejarlo en el nivel adecuado. Así es como funcionan la primera y la segunda generaciones del control de estabilidad.

La diferencia entre la primera y la segunda generaciones es la respuesta en caso de subviraje. En ese caso, la primera generación frena la rueda trasera interior a la curva, para aumentar la guiñada y, con ello, la fuerza centrípeta. En ciertos casos, esta estrategia no es la mejor posible porque no produce el efecto buscado con la rapidez suficiente.

Desde 2002 hay nuevos controles de estabilidad más eficaces en estas circunstancias. Opel lo denomina «ESP Plus» (hecho por TWR) y lo comercializa desde el último Vectra comercializado. Renault lo llama «ESP con control de subvirado» (hecho por Bosch) y lo tiene el Mégane y el nuevo monovolumen Espace. También está disponible en otros modelos, como el Mazda 6 y el Saab 9-3 Sport

Sedán. Conforme aparecen nuevos modelos, la presencia de esta segunda generación es cada vez mayor.

2.7. CONTROL DE TRACCIÓN: EDS /TCS

La finalidad del Sistema de Control de Tracción es evitar el deslizamiento de las ruedas motrices durante el inicio de la marcha y en el momento de acelerar, asegurando una alta estabilidad de conducción y tracción, y manteniendo la direccionalidad incluso en condiciones de baja adherencia. Se puede decir que hay dos tipos básicos de sistemas que controlan la tracción de las ruedas motrices:

- El primero de ellos, es el Diferencial Autoblocante Electrónico, denominado EDS. Este sistema busca la mejor motricidad del vehículo para evitar el deslizamiento de los neumáticos sobre firme deslizante o bajo una fuerte aceleración, comportándose el sistema EDS como un diferencial autoblocante. Así, actúa cuando una de las ruedas gira indiscriminadamente y la otra no. En este caso el vehículo no se moverá. El EDS frenará a la rueda con movimiento logrando que el diferencial transmita movimiento a la otra rueda y que el vehículo comience a moverse. El sistema EDS utiliza la instalación de freno y aprovecha también el sistema ABS, anteriormente descrito, para su funcionamiento [10].
- El segundo caso corresponde al Control de Tracción propiamente dicho. Este sistema, además de cumplir las funciones de diferencial autoblocante, limita el giro de ambas ruedas motrices. Por ejemplo, si ambas ruedas motrices perdieran adherencia y giraran por igual sin provocar el movimiento del vehículo, el EDS no podría solucionarlo ya que regularía el giro de las ruedas por diferencia de velocidad entre ambas; por el contrario, el control de tracción sí puede corregirlo.

El control de tracción, al igual que el control de estabilidad ESP, se sirve de los sensores del antibloqueo de frenos para funcionar, pero a diferencia del ESP, los controles de tracción sólo evitan que se produzcan pérdidas de motricidad por exceso de aceleración, y no son capaces de recuperar la trayectoria del vehículo.

3 SEGURIDAD

PASIVA

Los sistemas de seguridad pasiva actúan cuando se produce un accidente, y son los encargados de proteger a los ocupantes del vehículo en estas circunstancias. Estos sistemas actuarán cuando los sistemas de seguridad activa no hayan sido capaces de evitar el accidente [11].

Los elementos que componen los sistemas de seguridad pasiva que se pueden encontrar en un vehículo son el habitáculo de seguridad, airbag, el cinturón de seguridad, los reposacabezas, etc.

3.1. DEFORMACIÓN PROGRAMADA

Antes los coches se diseñaban con una carrocería muy rígida para que no se deformara si existiera una colisión. Esta medida conllevaba un gran peligro para los ocupantes ya que son ellos los que absorben toda la energía del impacto y resultaban gravemente heridos.

Por lo tanto se diseñó el concepto de la carrocería autoportante, que fue ideado de forma tal que permitiera absorber la mayor cantidad de energía posible

al deformarse de una manera predeterminada, en lugares concretos, para que se disipe en las piezas que la componen y en sus puntos de unión.

De esta manera, y al transformar la energía cinética de la colisión en energía de deformación, evita la transmisión de los daños al interior del vehículo y a sus ocupantes, lo que se traduce en una menor desaceleración para el cuerpo humano. Es preciso entender que en la mayoría de los casos de choques frontales, es la fuerte desaceleración del cuerpo lo que produce la muerte.

Para cumplir con este fin, se dispone de zonas claramente diferenciadas. Una es la zona central formada por el habitáculo de pasajeros que es la más rígida de la carrocería y está destinada a proteger a los ocupantes. Luego existen dos zonas extremas, una frontal y otra trasera, que son fácilmente deformables. Por esta razón son tan dañinos los choques laterales, y es porque el auto no está preparado ya que no tiene zonas de deformación. En la figura 3.1 se muestran dos vehículos uno con deformación programada y otro sin deformación programada.



Figura 3. 1 Comparación entre un vehículo con deformación programada y otro sin deformación programada.

El peso de los materiales utilizados y por lo tanto del vehículo en general es un factor importante. Cuanto menor sea, menor será la energía a disipar en caso de un choque, ya que estará directamente relacionada con la masa del vehículo y su velocidad en el momento del impacto. En la figura 3.2 se ve las zonas diferenciadas

en la carrocería de un vehículo.



Figura 3. 2 Zonas con diferentes aceros.

Los fabricantes para conseguir que se produzca la deformación programada utilizan las siguientes medidas:

- La inclusión de puntos fusibles en los largueros, pasarruedas y travesaños en forma de agujeros, acanaladuras, pliegues, a los efectos de provocar que en éstos se produzca la deformación.
- Se fabrican los cierres o tapas de largueros en varias partes, en lugar de una pieza única, contribuyendo a evitar transmisiones de daños.
- Son diversas las formas que adoptan los largueros, favoreciendo la disipación apropiada de la energía. Se construyen de sección creciente, para absorber energía de modo progresivo, con forma de horquilla, y así distribuir las fuerzas longitudinales al piso y zócalo. También existen en forma de cuello de cisne, para favorecer en caso de colisión frontal, que la mecánica tienda a desviarse hacia abajo, evitando su introducción en el habitáculo.

3.2. EL HABITACULO DE SEGURIDAD

Cuando se produce un choque, se desencadenan unas fuerzas de deformación de la carrocería que permite que sea ésta la que absorba la inercia, evitando daños a los ocupantes. Esto se denomina deformación progresiva y controlada de la carrocería [12].

En la zona interior se define una zona llamada habitáculo de seguridad, esta zona debe dañarse y deformarse lo menos posible, ya que si se deformase mucho podría llegar a causar heridas graves en los ocupantes del vehículo. En la figura 3.3 se puede observar un habitáculo de seguridad [13].

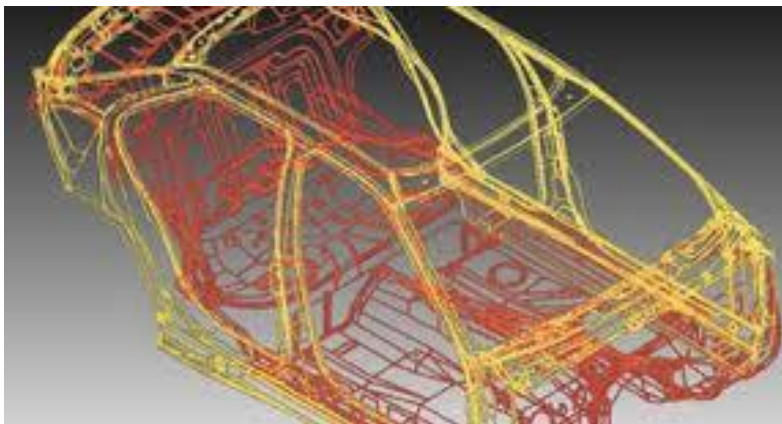


Figura 3. 3 Habitáculo de seguridad.

En los vehículos con carrocería autoportante, esto se consigue gracias a un diseño estudiado de la forma de la estructura básica del bastidor, así como de los refuerzos y elementos auxiliares.

Se pretende que la parte delantera y trasera, las más afectadas por las colisiones, se deformen transformando la inercia del choque en calor, hasta llegar a la zona del habitáculo, que debe mantenerse indeformable, evitando el daño de los ocupantes y permitiendo su salida y evacuación.

Se puede observar como existen pocas aristas y cantos en el interior del habitáculo, así como un acolchamiento de los elementos interiores para minimizar los daños. A estos efectos, son cada vez más utilizados los materiales plásticos y textiles para guarniciones y paneles, así como para el salpicadero.

El volante puede provocar serias lesiones en el conductor, ya que se encuentra enfrente de él. Para evitar daños en pecho y cara, la columna de dirección cumple con unos requisitos en caso de deformación del vano motor que

desplaza el volante fuera de esta área peligrosa. Es lo que se llama columna de dirección de seguridad.

Los cristales del automóvil, además de contribuir a la luminosidad y visibilidad, forman parte de la estructura del habitáculo, por cuanto están montados sobre él. Así, cuando se produce un choque y el chasis se deforma, éstos tienden a romperse, debido a su rigidez.

Las lunas delanteras, dada la gran superficie que ocupa, deben dotar al habitáculo de cierta rigidez, y no de proyectar cristales sobre la cara de los ocupantes de las plazas delanteras. Ello se consigue gracias a los cristales laminados y pegados, que sustituyen a las lunas de cristal tensionado, que aún se utilizan para el resto de ventanillas.

3.3. CINTURÓN DE SEGURIDAD

Se trata de una banda de tejido muy sólido compuesto, generalmente, de una banda lateral y un cinturón bajo, destinados a retener sobre su asiento al conductor y ocupantes del vehículo. El tejido debe ser extensible para absorber una parte del choque, pero no elástico, a fin de evitar una mala sujeción y, después, un choque por retroceso.

El cinturón de seguridad evita el llamado segundo impacto que es el impacto que ocurre cuando el vehículo ya ha impactado y el pasajero choca con las partes rígidas del vehículo.

Los cinturones de seguridad comenzaron a utilizarse primero en las aeronaves. El cinturón de las caderas debe estar situado por delante de las crestas ilíacas, los huesos que sobresalen en las caderas. Esto es para que sujete al cuerpo contra un hueso duro y no contra el abdomen blando.

Los primeros cinturones montados en fábrica se ofrecieron como opción en algunos Ford de 1956, dentro del paquete de seguridad *"SafeGuard"*. Robert McNamara fue el directivo de Ford que impulsó el montaje de los cinturones, así como otras medidas de seguridad tales como los salpicaderos acolchados.

Fue el ingeniero de Volvo Nils Bohlin quien inventó el cinturón de tres puntos, que se convertiría en la norma prácticamente universal para automóviles de calle. Volvo liberó la patente, para que todos los demás fabricantes pudiesen copiar el diseño.

El primer cinturón de seguridad montado de serie como equipamiento estándar en vehículos de producción masiva se montó en el Volvo Amazon de 1959. Este vehículo ya montaba un cinturón de tres puntos. Hasta la actualidad se han equipados a los vehículos con varios sistemas de cinturón de seguridad, como el cinturón de dos puntos, tres puntos, cuatro puntos, etc.

3.3.1. CINTURÓN DE DOS PUNTOS

Al principio los coches llevaban equipados cinturones de un solo tramo, es decir, cinturones de dos puntos. Este cinturón se colocaba sobre la cadera del ocupante del vehículo. Este tipo de cinturón de seguridad tenía un problema ya que al sufrir un impacto podía llegar a separar la espina lumbar y producir parálisis. Este cinturón se sigue utilizando en los autobuses y en los aviones. En la figura 3.4 se muestra un cinturón de dos puntos [14].



Figura 3. 4 Cinturón de dos puntos.

3.3.2. CINTURÓN DE TRES PUNTOS

Fue creado en el año 1959 por Volvo, liberó la patente para que las demás fabricantes pudieran equiparlos en sus modelos, y se sigue utilizando el actualidad. Fue desarrollado para resolver los problemas del cinturón de seguridad de dos puntos. Este modelo de seguridad da al ocupante una sujeción en la zona abdominal y el hombro. En la figura 3.5 se muestra un modelo de un cinturón de tres puntos.



Figura 3. 5 Cinturón de tres puntos.

Otros tipos de cinturones de seguridad son los cinturones de cuatro puntos, actualmente se usan en los coches de competición y en las sillas de los niños. Este cinturón consta de 3 partes, una primera tira de sujeción tiene forma de V con dos puntos de anclaje al asiento que se encuentran a la altura de los hombros del usuario. Esta V es retráctil y dispone de una hebilla en su parte central que permite el anclaje de dos tiras de cinturón mediante lengüetas. También en la actualidad existe otro tipo de cinturón de seguridad llamado cinturón de seguridad de cinco puntos, que es igual que el cinturón de cuatro puntos pero además incorpora una sujeción para las piernas. En la figura 3.6 se observan estos dos modelos de cinturón de seguridad.



Figura 3. 6 Cinturón de cuatro y cinco puntos.

Existen también otros elementos que aumentan la seguridad del pasajero al actuar también con el cinturón de seguridad, estos elementos son el carrete inercial, pretensor y limitador de esfuerzos o tensión.

El carrete inercial es el elemento encargado de desenrollar el cinturón cuando se realizan movimientos lentos mientras que bloquea el cinturón cuando se producen movimientos bruscos y retiene al pasajero. En la figura 3.7 se observa un carrete inercial.



Figura 3. 7 Carrete Inercial.

El pretensor del cinturón de seguridad es un dispositivo que, en caso de un choque frontal, compensa el alargamiento inevitable de los cinturones bajo la acción del cuerpo, manteniendo éste apoyado contra el respaldo del asiento. Cuando se produce un choque frontal, es indispensable que el cinturón se mantenga lo más cerca posible del cuerpo de forma que absorba de manera progresiva la energía cinética del cuerpo durante el choque del vehículo. Los pretensores pueden ser mecánicos o pirotécnicos. En la figura 3.8 se muestra un pretensor mecánico mientras que en la figura 3.9 se observa un pretensor pirotécnico [11].

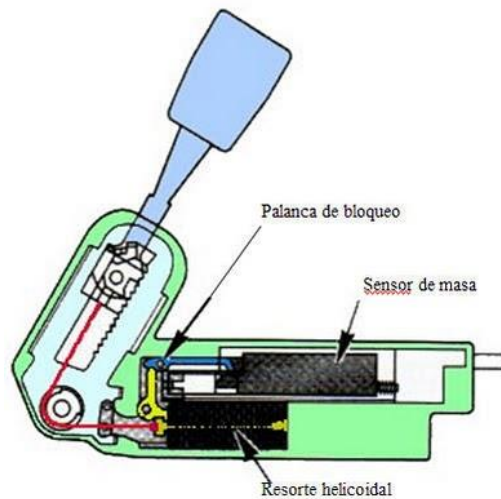


Figura 3. 8 Pretensor mecánico.



Figura 3. 9 Pretensor pirotécnico.

El limitador de esfuerzo es el dispositivo que se encarga de relajar la presión del cinturón para repartir mejor el esfuerzo, ya que cuando se produce una colisión la caja torácica choca contra el cinturón de seguridad y podría producir lesiones internas en el ocupante del vehículo. El limitador de esfuerzo ayuda a que la deceleración sea más suave, ya que cuanto más se alargue, menor valor tendrá y por lo tanto menores serán los daños producidos al viajero.

3.4. AIRBAG

Es una bolsa de aire que, en caso de impacto, se infla automáticamente y con rapidez, mediante la expansión de un gas. Es un sistema de retención suplementario al cinturón de seguridad que disminuye la posibilidad de tener lesiones graves. Si se activa cuando el ocupante del vehículo no está utilizando el cinturón de seguridad sufrirá grandes daños ya que el airbag no se puede utilizar nunca sin hacer uso del cinturón de seguridad. Según la situación de los airbags se consideran como airbags frontales, airbags laterales y airbags de cortina [15].

3.4.1. AIRBAG FRONTAL

Su principio de funcionamiento se basa en la absorción de la energía cinética del choque mediante la amortiguación que produce una bolsa llena de gas. Al chocar contra la bolsa, que debe estar completamente inflada en ese momento, el cuerpo transmite a la misma su energía, al tiempo que ésta le impide que se mueva y lesione.

Para el correcto funcionamiento del airbag la distancia del pasajero al airbag debe ser como mínimo de 30 cm, y nunca se deberá poner la silla de un bebe en frente de la salida de un airbag.

El airbag frontal se activa entre 5 y 20 milisegundos bajo impactos frontales y oblicuos de hasta 30° respecto del eje longitudinal del vehículo. Cuando la bolsa se infla alcanza velocidades de 250 km/h, lo que permite que esté completamente inflada cuando el cuerpo del ocupante la impacte. Luego del contacto del cuerpo del ocupante, la bolsa se desinfla automáticamente. En la figura 3.10 se muestra el funcionamiento del airbag frontal.

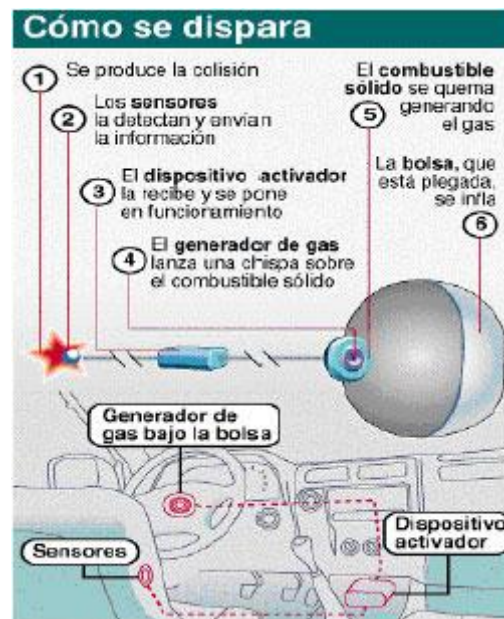


Figura 3. 10 Funcionamiento del airbag.

3.4.2. AIRBAG LATERAL

Los airbags laterales son bolsas de aire de alrededor de 12 litros de capacidad que se instalan en los asientos o bien en las puertas del vehículo. Su misión es proteger la cabeza y las caderas del ocupante, evitando el impacto de éste con la estructura de la puerta. Debido al escaso espacio entre el cuerpo del ocupante y la puerta del automóvil, la bolsa se despliega inmediatamente cuando detecta un impacto lateral, tardando alrededor de 3 milisegundos.

Al igual que en caso del airbag frontal, las bolsas de aire laterales reducen drásticamente su utilidad si se activan cuando el ocupante no tiene ajustado su cinturón de seguridad. En la figura 3.11 se muestra el airbag lateral de un Porsche.



Figura 3. 11 Airbag Lateral.

3.4.3. AIRBAG DE CORTINA

En algunos impactos, la presencia de airbags laterales no es suficiente para evitar que la cabeza de los ocupantes golpee las ventanas laterales, o que salga al exterior si estas están abiertas. Para controlar esta situación se desarrolló el airbag para la cabeza, que retiene el movimiento de la cabeza de forma controlada en caso de impacto.

Esta bolsa de aire se ubica en la parte interior del marco del vehículo, recubriendo el lateral a la altura de las ventanillas. En algunos modelos la bolsa es individual y de forma tubular, y en otros es un colchón de mayores dimensiones que protege a todos los ocupantes de un lado. Su tiempo de inflado es de 25 milisegundos. En la figura 3.12 se observa un airbag de cortina.



Figura 3. 12 Airbag de cortina.

3.5. REPOSACABEZAS

Incorporados en la parte superior del respaldo de los asientos, protegen la cabeza contra los fuertes movimientos hacia atrás en caso de accidente. En caso de colisión o alcance, la cabeza se desplaza hacia adelante y hacia atrás. Este movimiento de vaivén puede provocar graves lesiones en la columna vertebral que, incluso, podrían llegar a desnucar al conductor y ocupantes.

Los apoyacabezas suelen ser regulables para poderlos subir o bajar y adaptarlos a cada conductor u ocupante. Por tal motivo, el conductor ha de regular y adaptar el apoyacabezas a su propia constitución física, ya que si por ejemplo está demasiado bajo aumenta el riesgo de lesiones.

En la actualidad existen los llamados reposacabezas activos, al producirse la colisión, mediante un sensor detectan la colisión, por lo que activan unos muelles y permite el desplazamiento del reposacabezas para que el movimiento de la cabeza sea menor y las lesiones que se produzcan sean menores. En la figura 3.13 se enseña el funcionamiento de un reposacabezas activo.



Figura 3. 13 Reposacabezas activo.

3.6. ESPEJOS RETROVISORES ABATIBLES

Los espejos retrovisores abatibles se doblan hacia adentro al ser impactados cuando el vehículo circula hacia adelante. Los retrovisores son la parte más saliente de un automóvil, con lo que están más expuestos a golpes que el resto del vehículo. El hecho que un vehículo cuente con retrovisores abatibles permite reducir la posibilidad de lesiones en golpes a peatones o ciclistas.

4 ENSAYOS DE **CHOQUES**

Los altos índices de siniestralidad en las carreteras han hecho despertar la conciencia de los fabricantes de automóviles que no cesan de incorporar nuevas tecnologías, con el fin de hacer más confortable el vehículo, al mismo tiempo intentan aumentar la seguridad en caso de colisión. Todo ello con el fin de garantizar, en la medida de lo posible la máxima protección no solo de los ocupantes del propio vehículo, sino también procurar que los ocupantes de otros vehículos, o los posibles peatones implicados en la colisión, sufran las mínimas consecuencias [16].

Hoy en día, no solo los fabricantes buscan la máxima seguridad para sus automóviles, también los potenciales compradores buscan un vehículo, que al mismo tiempo que satisface todas sus necesidades de espacio y confort, protege tanto a él mismo como al resto de ocupantes del vehículo de los posibles daños que pudieran sufrir en caso de colisión leve o grave, obligando a los fabricantes a permanecer en una lucha continua para conseguir el coche más seguro en su

categoría sin dejar de satisfacer las necesidades que demandan los usuarios. En la figura 4.1 se observa el estado de un coche al ser sometido a un *crash test* [17].



Figura 4. 1 Estado de un coche tras ser sometido a un *crash test*.

Con el fin de estudiar el comportamiento de los vehículos en caso de colisión, la industria automovilística cuenta con los servicios de especialistas de gran prestigio, entre los que se encuentran médicos y expertos de tráfico que valoran la gravedad de las colisiones.

Desde hace algunos años se trabaja en la simulación virtual de accidentes, convirtiéndose este, en un medio esencial para el perfeccionamiento de la seguridad pasiva de los automóviles. Aun si, este no es sustituible por pruebas físicas (pruebas de choque), donde se evalúa con mayor precisión el grado de deformación de la estructura del automóvil y como afecta esta deformación sobre la aparición de lesiones en los ocupantes del vehículo en los diferentes tipos de accidentes. En la figura 4.2 se muestra una simulación por ordenador de un choque.



Figura 4. 2 Simulación por ordenador de un choque.

Las pruebas de choque, más conocidas como *crash test* son simulaciones de accidentes realizadas en laboratorios. Con ello se consigue determinar los fenómenos técnicos y físicos implicados en una colisión y el comportamiento de la

carrocería en caso de impacto, mediante la medición de esfuerzos soportados por los *dummies*, y de las mediciones dimensionales del habitáculo de pasajeros.

Los diferentes tipos de prueba de *crash test* evalúan la eficacia global de los sistemas de seguridad pasiva del vehículo, lo que ha incidido de forma directa en la gran evolución que han experimentado los mismos. Del resultado de estas pruebas se extraen conclusiones muy valiosas, no solo de temas relativos a la seguridad de los ocupantes de los vehículos, sino también información relativa al grado de reparabilidad de la carrocería, en función de la magnitud y lugar del impacto.

En los *crash test* se ha comprobado como una carrocería de estructura rígida sería altamente peligrosa para el cuerpo humano ya que la energía del impacto sería absorbida por los ocupantes del vehículo y esta energía causaría importantes lesiones en los ocupantes del vehículo. Por otro lado si la carrocería del vehículo fuera demasiada deformable también conllevaría peligro para los ocupantes del vehículo, ya que como se explicó anteriormente en el capítulo 3 SEGURIDAD PASIVA, se aplastaría demasiado y aplastaría a los ocupantes del vehículo.

Por este motivo los fabricantes de automóvil, mediante el uso de este tipo de pruebas, pretenden conseguir, que en caso de colisión la carrocería del vehículo sea lo suficientemente flexible como para absorber la mayor parte de la energía generada en el impacto evitando de esta forma una deceleración excesiva y que al mismo tiempo sea lo suficientemente rígida como para mantener el habitáculo de seguridad en el mejor estado posible, evitando el aplastamiento de los ocupantes.

4.1. HISTORIA DE LOS *CRASH TEST*

Bridget Driscoll, una mujer inglesa de 44 años, fue arrollada por un automóvil que circulaba a tan solo 6 kilómetros por hora. Increíblemente, la mujer murió como consecuencia de las heridas recibidas en la cabeza. El hecho ocurrió en 1896 y constituyó la primera muerte en un accidente de tráfico. A partir de este momento las marcas de los automóviles empezaron a preocuparse por la seguridad vial [18].

La inquietud de construir vehículos más seguros hizo que los ingenieros comenzaran a ensayar con sus productos, pero no tenían ni experiencia ni métodos precisos para hacerlo. En los primeros años del siglo pasado se probaban vehículos

con cadáveres en su interior. Estos debían pasar el período de rigidez y luego se intentaba imitar la condición de vida. Los muertos eran cubiertos con vendas y se les inyectaba un líquido que simulaba sangre en el caso de una lesión. Se colocaban instrumentos sujetos en los huesos para medir la fuerza que se necesitaba para quebrarlos. Pero el verdadero escándalo se desató cuando se realizaron pruebas con cadáveres de bebés.

Al principio los fabricantes de automóviles se concentraban en mejorar las técnicas en lo que se refiere a la potencia e idoneidad para el uso cotidiano. Pero a partir de la década de los años 40 comenzaron a ocuparse seriamente de la seguridad. La fábrica alemana Daimler-Benz dio el puntapié inicial con la premisa de "Diseñar todos los elementos del automóvil incluso los más pequeños detalles teniendo en cuenta la seguridad". Las fabricas de las marcas de automoviles hacían pruebas del comportamiento de los materiales y de las deformaciones producidas por el aplastamiento en el caso de un choque frontal se aplastaban paragolpes de automóvil en un laboratorio experimental.

Hacia la década del 50 la velocidad y el número de coches aumentaron considerablemente llegando a producir cada vez más accidentes de tráfico y cada vez más graves. Eso motivó el interés de los especialistas quienes buscaban la manera de evitar o al menos suavizar las consecuencias de estos accidentes.

En 1958 se iniciaron en forma periódica y sistemática los primeros ensayos físicos. Esos primitivos experimentos dieron origen al cinturón de seguridad elemento que sigue vigente en la actualidad como uno de los más importantes para salvar vidas en accidentes automovilísticos.

En la década de los años 60, los fabricantes comprendieron que era necesario efectuar pruebas prácticas en condiciones reales para mejorar la seguridad de sus vehículos. Los automóviles todavía no llevaban incorporados habitáculos de seguridad ni de zonas de deformación programada por lo que solo se deformaban mínimamente aunque el impacto se produjera a alta velocidad.

Los técnicos de la investigación seguían siendo arriesgados. Se llegaron a realizar pruebas con conductores vivos a cambio de dinero. Los conductores conducían contra muros, frente a otros autos sin colocarse el cinturón de seguridad ni cualquier otro tipo de elemento de prevención. Se dejaron de realizar este tipo de ensayos por la muerte de varios conductores.

En 1966 el Gobierno de Estados Unidos ordenó que se estableciera una serie de normas básicas para mejorar la seguridad de los automóviles. Estas

sirvieron como patrón para otros países. De esta manera se incrementó el número de pruebas. La investigación incluía disciplinas científicas como biomecánica ampliando el conocimiento sobre la capacidad de aguante y de resistencia del peso del cuerpo humano.

Para complementar la nueva legislación se creó el programa de Vehículos Experimentales de Seguridad (VES). Diferentes fabricantes crearon 15 prototipos para probar nuevos conceptos de autos seguros. Este programa dio origen a numerosas técnicas y elementos de seguridad como, por ejemplo, el airbag.

En 1971, en la historia de los *crash test* se produjo un gran avance en la investigación con la incorporación de los *dummies*, los muñecos que simulan al cuerpo humano en el estudio de las características físicas originadas en diferentes accidentes automovilísticos. A dichos *dummies*, los distintos investigadores les fueron mejorando las articulaciones que unían diferentes partes del cuerpo humano como los hombros, la columna y las rodillas. Esto permitió brindar más datos en el análisis de las consecuencias físicas en un choque.

Hasta ese momento todas las pruebas de impacto se realizaban al aire libre. Pero a partir de 1973 los *crash test* de alta velocidad se comenzaron a desarrollar en naves de ensayo con modernas instalaciones para evitar que las personas que estuvieran mirando sufrieran algún accidente.

En 1984 los fabricantes incorporaron a sus propias pruebas los *crash test* frontales con barrera deformable, traseros, laterales y de vuelco. Más adelante en 1992 se llevó a cabo por primera vez una prueba de impacto frontal asimétrica con barrera deformable.

En 1997 se incorporó la prueba de vehículo contra vehículo. Este ensayo arrojó como resultado nuevos conceptos de carrocería como el salpicadero elipsoidal y la protección contra empotramiento en el frontal del vehículo.

Se creó el Euro NCAP, un programa de investigación de nuevos vehículos, para brindar datos independientes e imparciales de los nuevos automóviles que se ponen a la venta. Para esta finalidad, el programa realiza tres tipos de ensayos: impacto frontal, lateral y de protección a peatones.

A partir del año 2000 se hicieron dos pruebas más, la prueba de choque lateral contra un poste y la prueba de ensayos con sillitas de retención infantil. La última prueba que ha entrado en el año 2005 es la prueba frente a la protección de peatones en caso de atropello. En la 4.3 se observa la secuencia de un atropello de un *crash test*.



Figura 4. 3 Secuencia de un crash test de un atropello.

4.2. ASOCIACIONES

Con el objeto de traducir el resultado de las pruebas de choque de automóviles en calificaciones de fácil comprensión para los consumidores, nacen asociaciones como EuroNCAP (NEW CAR ASSESSMENT PROGRAM o programa de evaluación de nuevos vehículos), un consorcio independiente que agrupa a distintas administraciones y asociaciones europeas que representan a más de 150 millones de consumidores [19].

Nació en 1997 y entre sus integrantes destacan el Departamento de Transportes del Reino Unido, Suecia, Holanda, Francia, Alemania, etc. En España participan en EuroNCAP, el RACE (Real Automóvil Club de España), el RACC (Real Automóvil Club de Cataluña) y la OCU (Organización de Consumidores y Usuarios).

Estas pruebas se realizan por grupos de vehículos dentro de un mismo segmento (utilitarios, berlinas, monovolúmenes, etc.) siendo calificados los vehículos mediante un número de estrellas, que oscila entre cero y cinco, dependiendo del grado de seguridad que ofrezca el vehículo, tanto a sus ocupantes como a los posibles peatones que puedan intervenir en una colisión.

El programa EuroNCAP pretende ofrecer a los consumidores una información, independiente de la ofrecida por los fabricantes, del nivel de seguridad que posee el vehículo que adquieren. Las pruebas realizadas por EuroNCAP, se realizan una vez el vehículo se pone a la venta y sus ensayos se componen de una prueba de impacto frontal, una de impacto lateral y otra de protección a los peatones.

Los ensayos de impacto frontal difieren de los realizados por los fabricantes, siendo los realizados por EuroNCAP más exigentes. Este tipo de pruebas son realizadas del mismo modo que las obligatorias para pasar los test de homologación, pero EuroNCAP las realiza a una velocidad mayor a 64 km/h.

Además de los *dummies* sentados en los asientos delanteros, se sitúan dos *dummies* infantiles en los asientos traseros, uno que representa a un niño de 18 meses, y otro que representa a uno de 3 años, ambos sentados en sillas de retención infantil recomendadas por los fabricantes. En la figura 4.4 se muestra una imagen de un *dummy* infantil.



Figura 4. 4 Dummy Infantil.

El programa EuroNCAP publica los resultados de estas pruebas otorgando una calificación a cada vehículo por estrellas y graduando el tipo y grado de lesiones que sufrirían los ocupantes del vehículo en un impacto frontal y lateral.

4.3. HISTORIA DEL DUMMY

Hasta este momento se ha estudiado el comportamiento de la estructura de los vehículos ante diferentes tipos de impactos. Estos resultados eran incompletos ya que se necesita información sobre las personas involucradas en un accidente, es decir, ocupantes y peatones. Para recoger esta información es necesaria la utilización de *dummies* que son maniquíes que se asemejan lo más posible al cuerpo humano [15].

El primer *dummy* fue llamado *Sierra Sam*, este *dummy* fue diseñado para pruebas con asientos eyectables y arneses de seguridad de aviones en 1949. El

primer *dummy* que se construye para pruebas de choques en la década de 1950 construido por Alderson y Grumman.

Se produce una competencia a dos bandas y nace la serie "VIP-50" de Alderson y el Sierra Stan de Sierra para General Motors. En 1971 con lo mejor de los dos modelos se creó el *dummy Hybrid I*, este modelo fue concebido como un maniquí con las características de un ser humano masculino. En la figura 4.5 se observa una imagen de un *Hybrid I*.



Figura 4. 5 Hybrid I.

El *Hybrid I* era un *dummy* masculino de percentil 50, es decir, tenía las características de un ser humano de sexo masculino promedio en cuanto altura, masa y proporciones.

El *Hybrid II* se creó en 1972, era un modelo más real con la inclusión en el modelo de rodillas, hombros y columna vertebral. Fue el primer *dummy* que cumplió estándar norteamericano para ensayos de cinturón de seguridad. Dos años más tarde se creó el *dummy* percentil 50.

La National Highway Transportation Safety Administration (NHTSA) firmó un acuerdo con General Motors para crear un modelo que mejorará a éste. En la figura 4.6 se ve dos *dummies*, uno de ellos el *Hybrid II* y el *Hybrid III*.



Figura 4. 6 Hybrid II y Hybrid III.

En el año 1976 el *Hybrid III* fue desarrollado por General Motors aportando modelos masculinos, femeninos y de niños y bebés. Al *Hybrid III* hay que sumarle el *EuroSID* a finales de la década de 1980, este *dummy* fue especialmente diseñado para pruebas de impacto lateral. Esta serie se utiliza para impactos ya que incorpora bastantes sensores repartidos por su cuerpo y se pueden conocer bastantes datos.

La cabeza del *dummy* está fabricada de aluminio y cubierta de piel de caucho. Tiene tres sensores que aportan información sobre la repercusión del golpe en el cerebro. En el cuello tiene varios sensores que miden la fuerza y la tensión del cuello durante el impacto.

El *Hybrid III* posee en el pecho sensores en las costillas que miden la desviación del esternón que se produce durante el impacto frontal. En el modelo *EuroSID* los sensores se encuentran en las costillas que mide la compresión del pecho en choques laterales. En el abdomen sólo el modelo *EuroSID* posee sensores

que registra la fuerza que se produce durante un choque lateral. En la figura 4.7 se muestra un imagen del *Hybrid III* y el *EuroSID-II*.



Figura 4. 7 Hybrid III y EuroSID-II.

Del modelo *Hybrid III* se crearon varios modelos diferenciándolos por tamaño, sexo, edad. La serie *Hybrid/III* es la siguiente:

- *Hybrid III* percentil 50: Altura de 168 cm. con 77 kg. de masa. Ocupa el asiento del conductor.
- *Hybrid III* percentil 95: segunda versión masculina de 188 cm. de alto y 100 kg de masa. Ocupa el lugar del acompañante.
- *Hybrid III* percentil 5: versión femenina de 152 cm. y 50 kg.
- *Hybrid III* infantil de seis años de 21 kg. de masa.
- *Hybrid III* infantil de tres años de 15 kg. de masa.

Este modelo de *dummy* posee cuarenta y cuatro canales de lecturas de datos los cuales están distribuidos en todo su cuerpo. Estos sensores pueden registra entre 30.000 y 35.000 datos durante 100-150 milisegundos que es la duración aproximada de un choque típico. Esta información es almacenada en el tronco del *dummy*. En la figura 4.8 se muestra la serie *Hybrid III*.



Figura 4. 8 Familia dummy Hybrid III.

4.4. PRUEBAS DE CHOQUE

Debido a que la legislación vigente, los vehículos tienen que pasar un proceso de homologación por lo que tienen que cumplir unos requisitos mínimos. Para que las pruebas se asemejen a la realidad hay que tener en cuenta la variedad de accidentes que se puede producir en la realidad [19].

Para asegurarse que sea un vehículo seguro, el vehículo pasará diferentes pruebas de choque y se repartirán para asegurarse la correcta realización de estas pruebas. Los fabricantes realizan más de 40 tipos diferentes de pruebas. Los fabricantes realizan estas pruebas y se encuentran algún fallo de diseño pueden repararlo antes de pasarlo al organismo homologador.

En los choques frontales se busca optimizar los refuerzos de la estructura portante y de los sistemas de retención. En los choques laterales se intenta evitar la intrusión en el habitáculo y se busca la mejor forma de alejar al ocupante de la zona de impacto. En los choques traseros se estudia el comportamiento del reposacabezas y del depósito de combustibles y sus canalizaciones. En el caso de vuelco se pretende limitar o evitar las deformaciones del habitáculo por aplastamiento.

4.5. TIPOS DE PRUEBAS DE CHOQUE

Los choques laterales representan el 25 por ciento de todos los accidentes que se producen. En los impactos laterales es mucho más difícil la protección de los ocupantes del vehículo. Este tipo de colisión provoca graves lesiones sobre los ocupantes debido a la baja capacidad de absorción de las piezas de la estructura y

del revestimiento, y a las grandes deformaciones que de ello resultan en el habitáculo.

4.5.1. IMPACTO FRONTAL

Los impactos frontales son los accidentes de tráfico que más se produce. Este tipo de prueba está regulado por el Reglamento 95. El vehículo es lanzado contra un muro deformable a una velocidad de 56 km/h si se realiza siguiendo la normativa europea mientras que se lanza a 64 km/h si se realiza siguiendo el criterio EuroNACP. En este ensayo se produce un solape de un 40% para simular el choque con la columna de la dirección. En el interior del vehículo se encuentra dos *dummies* en las posiciones delanteras del vehículo. En la figura 4.9 se muestra un impacto frontal.

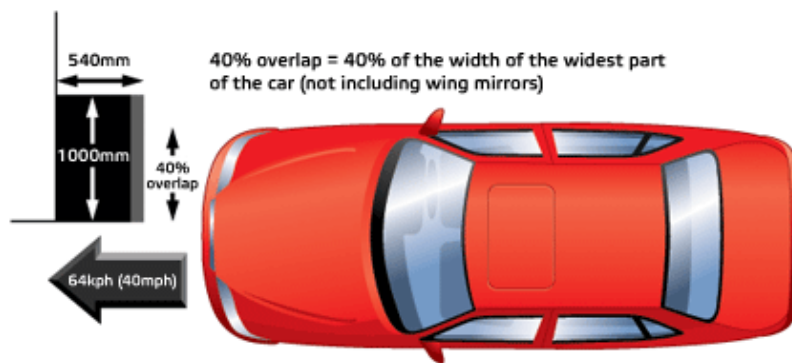


Figura 4. 9 Impacto Frontal.

El desplazamiento residual del volante, y en la parte superior de la columna de la dirección, no será superior a 80 mm. No deberá abrirse ninguna puerta durante el impacto. En la figura 4.10 se observa el estado de un coche tras sufrir un choque frontal.



Figura 4. 10 Estado de un coche tras sufrir un choque frontal.

4.5.1.1 IMPACTO FRONTAL CONTRA UNA BARRERA RÍGIDA

Esta prueba se realiza a 50 km/h y se lanza contra una barrera rígida poniendo un 40% de superposición. Esta prueba se realiza para comprobar las sollicitaciones de los pasajeros, la estanqueidad de la instalación de combustible, la estructura del vehículo y la posibilidad de socorro tras producirse un accidente.

4.5.1.2 IMPACTO FRONTAL CONTRA UN POSTE

Esta prueba se realiza contra un poste a una velocidad variable entre 32-50 km/h. La carga que lleva el vehículo es únicamente la de los ocupantes de los asientos delanteros del coche. En esta prueba se comprueba las sollicitaciones de los pasajeros, la estructura del vehículo y el habitáculo de seguridad. En la figura 4.11 se muestra el ensayo.



Figura 4. 11 Choque frontal contra un poste.

4.5.2. IMPACTO LATERAL

El 25% de los choques que se producen son choques laterales. Este tipo de accidentes provocan graves lesiones debido a que las defensas de los vehículos son mínimas. El diseño de los asientos es de gran importancia ya que al encontrarse el cinturón en ellos, deben de tener una rigidez estructural suficiente para soportar las fuerzas sobre el cinturón.

4.5.2.1. IMPACTO LATERAL CONTRA OTRO VEHÍCULO

Este ensayo también está regulado por el Reglamento 95 y es obligatoria desde 1998. El ensayo consiste en lanzar una barrera deformable móvil de 950 kg. a una velocidad de 50 km/h sobre el coche que se quiera estudiar que se encuentra inmóvil. En el interior del coche sólo se situará un *dummy* en el lado de donde el *bogie* impactará, es decir en el lado del conductor.

Durante la realización de la prueba no podrá abrirse ninguna puerta alguna. Después de la colisión deberá ser posible abrir un número de puertas para la salida de los ocupantes del vehículo. El motivo de la prueba es saber la sollicitación de los pasajeros, la estructura del vehículo. En la figura 4.12 se muestra las condiciones de un choque lateral según la EuroNCAP y en la figura 4.13 se ve el estado de un vehículo tras sufrir un impacto lateral.

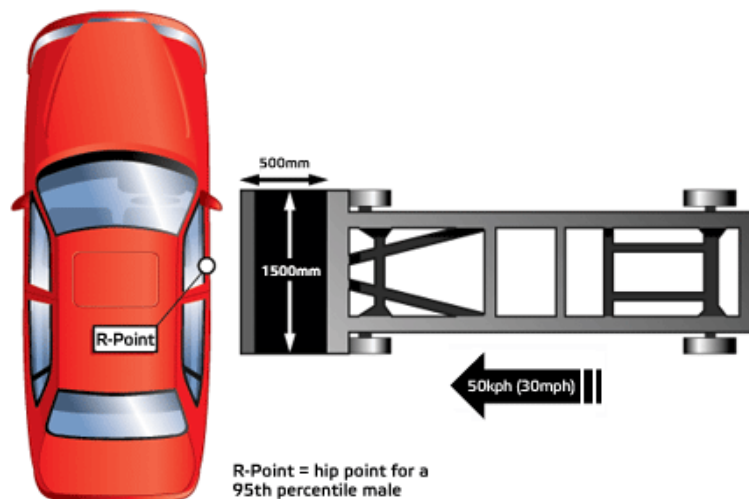


Figura 4. 12 Choque lateral según EuroNCAP.



Figura 4. 13 Estado de un coche tras sufrir un choque lateral.

4.5.2.2. IMPACTO LATERAL CONTRA UN POSTE

Este tipo de ensayo se realiza lanzando el coche a estudiar en una plataforma a 29 km/h contra un poste de 254 mm de diámetro, es lo suficiente estrecho como para producir una mayor intrusión. Dentro del vehículo se situará una *dummy* en el lado de impacto. Esta prueba se realiza para verificar la eficacia de los airbags laterales y la estructura de las puertas después del impacto. En la figura 4.14 se observa las condiciones del ensayo contra un poste de la EuroNCAP.

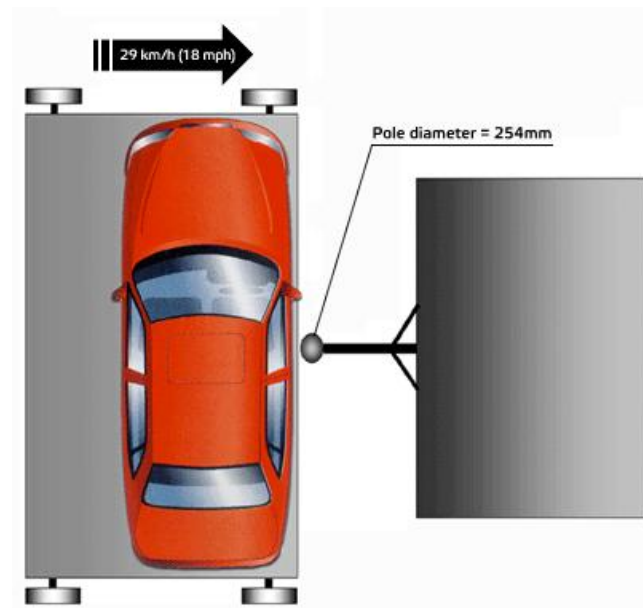


Figura 4. 14 Ensayo lateral contra un poste.

4.5.3. VUELCO

Los test de vuelco ponen a prueba la rigidez de la estructura del techo. Este tipo de *crash test*, suele realizarse en dos fases, en la primera se sitúa el vehículo en una plataforma con una cierta inclinación, y en la segunda fase, la carretilla se desplaza a una velocidad de 50 km/h y, posteriormente se frena bruscamente provocando que el vehículo salga despedido y de vueltas de campana hasta que se detiene.

En otras ocasiones el vehículo se somete a una caída libre desde 50 cm. de altura sobre la esquina delantera izquierda del techo. Tanto en un tipo de prueba como en la otra, el habitáculo no debe sufrir deformaciones de importancia, que

pongan en peligro la integridad de los ocupantes. En la figura 4.15 se observa el estado de un coche tras volcar.



Figura 4. 15 Estado de un coche tras sufrir un ensayo de vuelco.

Para disminuir los riesgos de lesiones, es preciso que el techo y los montantes dispongan de una rigidez óptima. Con el fin de mejorar el grado de rigidez del techo, se realiza también otro tipo de prueba, consistente en aplicar una serie de esfuerzos de compresión sobre los montantes y así analizar su rigidez, resistencia y grado de deformación. En la figura 4.16 se observa los diferentes tipos de ensayos de vuelco.

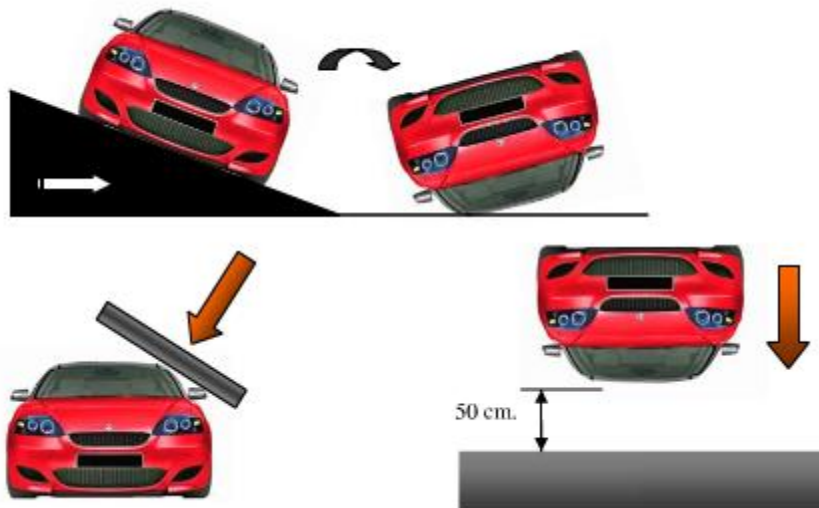


Figura 4. 16 Diferentes ensayos de vuelco.

4.5.4. IMPACTO TRASERO

La normativa actual establece que una carretilla móvil impactará con una velocidad entre 35-38 km/h sobre el vehículo. Después del ensayo todas las puertas deberán poder abrirse, no se permite ninguna fuga de combustible y los reposacabezas deben evitar la hiperextensión del cuello de los ocupantes. En la figura 4.17 se muestra un ensayo trasero.

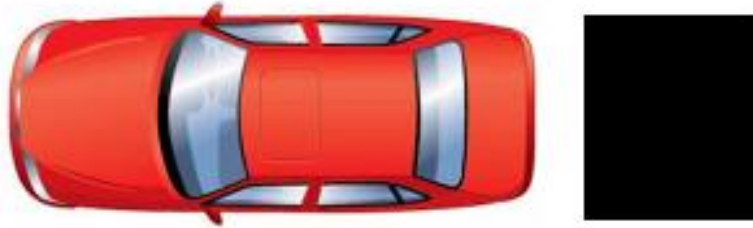


Figura 4. 17 Alcance trasero.

4.5.5. PRUEBAS CON SILLITAS

Se realizan en un simulador provisto de un tren de choque al que se sujeta la sillita con el *dummy* infantil. Este sistema de simulación de colisión está diseñado exclusivamente para sillitas de automoción. Esta prueba sólo es obligatoria para un impacto frontal, algunas organizaciones realizan más ensayos para las sillitas de los niños. En la figura 4.18 se muestra la colocación de una sillita de niño en la parte interior del vehículo.



Figura 4. 18 Ensayo de un sillita para niños.

5 EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Una de las tareas fundamentales del ingeniero consiste en el análisis y cálculo, esto es la predicción cuantitativa del comportamiento de un sistema tecnológico o un proceso para proceder a su diseño eficiente o para cumplir con especificaciones de producción [21].

Para ello debe hacer uso de conceptos de física, química y matemática, para formular un modelo matemático del sistema o proceso en consideración. Dicho modelo no es más que un sistema de ecuaciones cuyas incógnitas representan magnitudes de interés tecnológico que permiten describir el comportamiento del objeto bajo análisis. Consecuentemente, para llevar a cabo la predicción en sí misma, el ingeniero debe resolver cuantitativamente las mencionadas ecuaciones

para dedicarse, a continuación, a la interpretación técnica y al análisis de los resultados.

En muchas situaciones, los modelos pertinentes involucran problemas de contorno gobernados por ecuaciones diferenciales a derivadas parciales. Por mencionar algunos de dichos casos pueden citarse el estudio estructural de automóviles, aviones, puentes, o el análisis de campo de flujo de calor en componentes de máquinas, flujo de fluidos, filtración en presas de tierra, etc.

Debido a la gran dificultad para obtener soluciones analíticas a las ecuaciones aludidas, la ingeniería ha recurrido, históricamente, al uso de modelos simplificados basados en resultados experimentales, experiencia y en el mejor de los casos en unas pocas soluciones matemáticas particulares relativas a un modelo más preciso. Esta metodología general de la ingeniería ha dado muy buenos resultados y aún lo sigue haciendo. No obstante, es importante notar que se trata de una metodología que presenta fuertes limitaciones en cuanto a las posibilidades de análisis, hecho que se hace más grave si se consideran las crecientes necesidades de la tecnología moderna [22].

Este cuadro ha ido cambiando con el advenimiento de la computación electrónica y con el desarrollo asociado de métodos computacionales. En el contexto que se alude han aparecido importantes técnicas numéricas entre las cuales se destacan los métodos de diferencias finitas, elementos de contorno y elementos finitos.

El desarrollo de los elementos finitos ha estado ligado al cálculo estructural fundamentalmente en el campo aeroespacial. Los métodos predominantes consistían en método iterativos que había que resolverlos manualmente por lo que se tardaba bastante tiempo. La llegada del ordenador permitió la resolución de estos modelos en un tiempo mucho menor.

Como se ha comentado anteriormente, el ahorro de tiempo con la aparición del ordenador fue considerable. En los años 60 y 70 se produce un gran crecimiento de los fundamentos del método a otros problemas como los no lineales. Se estudian nuevos tipos de elementos y se sientan las bases matemáticas rigurosas del método.

A partir de la década de los 80 se extiende el uso comercial de estos programas, como los pre y postprocesadores gráficos que realizan el mallado y la representación gráfica de los resultados.

5.1. PRINCIPIOS BÁSICOS Y APLICACIONES

La idea general del método de los elementos finitos es la división de un continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. El método se basa en pasar un sistema de infinitos grados de libertad a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no lineales.

En cualquier sistema analizar se puede distinguir entre el dominio que es el espacio geométrico donde se va a analizar el sistema. Las condiciones de contorno que son las variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema como las cargas, desplazamientos, temperatura, etc. Por último quedan definir las incógnitas del sistema que son las variables del sistema que se desean conocer después de haber resuelto el sistema de ecuaciones.

El proceso por el cual soluciona los problemas es mediante la discretización. Este proceso de discretización es dividir el dominio mediante puntos en un caso lineal, en líneas en un caso bidimensional o superficies en un caso tridimensional. Los elementos se dividen en nodos que son puntos discretos que se conectan entre sí formando los elementos.

Tras este proceso de discretización y con las condiciones de contorno aplicadas al sistema, este sistema se resuelve de forma lineal hasta llegar a su estado final. Si en algún momento de la resolución del problema surgiera una ecuación no lineal tendrá que ser resuelto de forma lineal.

El método de los elementos finitos actualmente constituye un potente método de cálculo numérico. Este método resuelve los sistemas de ecuaciones que simulan cualquier problema físico como la mecánica de fluidos, de la transferencia de calor del magnetismo, etc.

Este método tiene sus limitaciones ya que no siempre se pueden caracterizar bien las condiciones de contorno, los procesos de fabricación, etc. Por lo tanto el ingeniero debe ser capaz de realizar la mejor aproximación al problema para conseguir el resultado que más se asemeje a la realidad. El analista tiene que saber interpretar los resultados calculados por el programa.

Por esta razón es muy importante comparar los resultados obtenidos mediante el cálculo por ordenador con otros resultados obtenidos mediante la

experimentación. Los errores más comunes en este método son los errores de discretización, de formulación y los errores numéricos.

5.2. PROBLEMAS NO LINEALES

Una de las mayores simplificaciones que se puede llevar a cabo en el cálculo estructural es el comportamiento lineal de la geometría del problema como el del comportamiento del material.

Si en el problema se tienen pequeñas deformaciones, se puede dar como válido el comportamiento lineal geométrico del problema. Las solicitaciones y las condiciones de contorno pueden estar referidas a la estructura sin deformar, es decir, la estructura inicial [23].

El comportamiento no lineal de un material queda claro al observar una curva tensión-deformación. La tensión no es linealmente dependiente a la deformación. La curva es lineal hasta que se alcanza el límite elástico y justo después de ese punto se observa que ya no tiene un comportamiento lineal. En el primer tramo de la curva se ve que la gráfica depende del módulo de Young. En la figura 5.1 se muestra una curva tensión-deformación del acero.

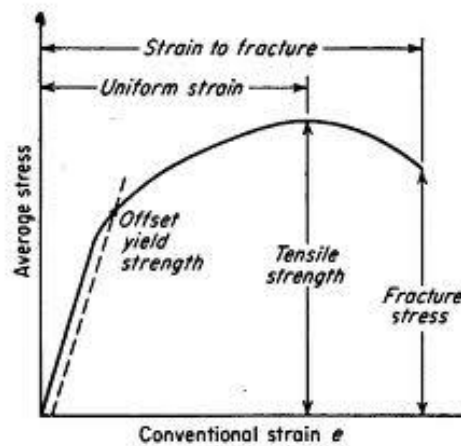


Figura 5. 1 Curva-tensión deformación del acero.

Otro problema con la no linealidad son los elementos pertenecientes al problema como pueden ser los cables, ya que los cables no trabajan a compresión pero si a tracción.

En un impacto lateral entre dos vehículos es de gran importancia introducir en el modelo el comportamiento de no linealidad ya que al producirse grandes deformaciones los materiales entran en la zona donde desaparece la linealidad

entre la tensión y la deformación, es decir entra en la zona plástica del material. También existen comportamientos no lineales cuando se producen contactos entre elementos diferentes durante la colisión.

5.3. LS-DYNA

LS-Dyna es un programa informático que utiliza el método de elementos finitos capaz de simular problemas complejos del mundo real [24].

El programa en el que se basa LS-Dyna es el software desarrollado en los años 70 Dyna3D por el Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL). Desde esa fecha se ha ido mejorando gracias a la inversión de las industrias automovilística, aeroespacial y militar. Dentro de la industria automovilística se ha especializado en la simulación de los accidentes, ahorrando grandes cantidades de dinero gracias a las pruebas por ordenador detectando problemas de diseño. En la figura 5.2 se muestra un ensayo de choque simulado por ordenador.

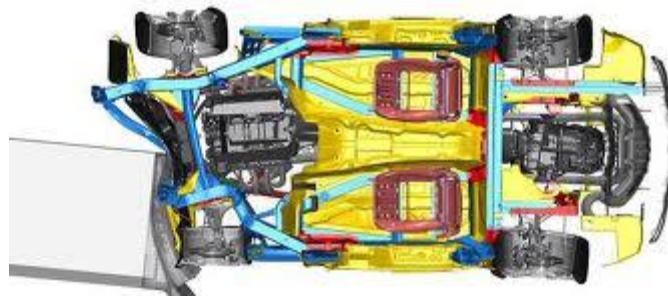


Figura 5. 2 Choque simulado por ordenador.

LS-Dyna ha demostrado que puede simular problemas dinámicos muy complejos de la realidad, con una gran especialización en accidentes de automóviles.

La principal forma de cálculo se basa en la integración explícita. Tiene incorporado un algoritmo de impacto y contacto permite tratar problemas complejos de la realidad, debido a este algoritmo hace que no sea necesario mallar las zonas de transición para obtener resultados fiables.

El programa brinda una gran variedad de formulaciones para cada elemento. Este programa se ha especializado en la industria automovilística llegando incorporar al sistema airbags, cinturones de seguridad y sensores. En la figura 5.3 se ve una imagen de un *dummy* con un cinturón de seguridad.



Figura 5. 3 Dummy simulado por ordenador con cinturón.

Este programa ha sido desarrollado por la empresa Livermore Software Technology Corporation(LSTC) [2].

Para crearse el archivo, es necesario el pre y postprocesador Ls-PrePost. Ls-PrePost permite la creación de airbags, cinturones de seguridad, modelos de *dummy*, sensores, acelerómetros, etc. En la figura 5.4 se observa un airbag creado mediante el uso del Ls-PrePost.

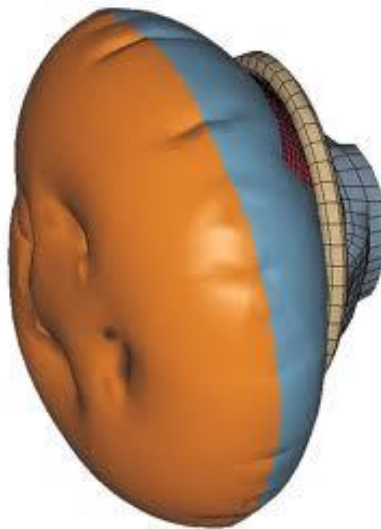


Figura 5. 4 Airbag creado con Ls-PrePost.

Una vez ejecutado el archivo con LS-Dyna, los datos son visualizados gracias a la función de postprocesador de Ls-PrePost. Nos permite visualizar las gráficas de desplazamientos de los nodos, velocidades, aceleraciones,

deformaciones, etc. También este programa lleva a cabo cálculos más específicos como el HIC, calcula el daño sufrida en la cabeza (HEAD INJURY CRITERION) y el CSI, determina el daño que sufre durante una colisión en el tórax (CHEST SEVERITY INDEX). En la figura 5.5 se ve una gráfica hallada mediante Ls-PrePost.

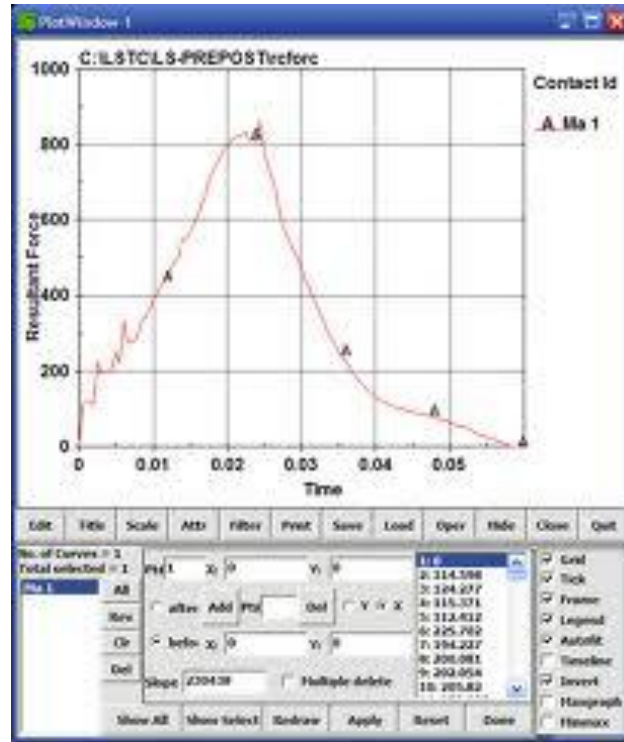


Figura 5. 5 Gráfica hallada mediante Ls-PrePost.

6 REGLAMENTO 95

La directiva actual que rige la homologación de vehículos en lo relativo a la protección de sus ocupantes en caso de colisión lateral es el reglamento 95 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas aprobado el 18 de julio del 2005.

Esta directiva se aplicará para vehículos a motor de las categorías M_1 y N_1 , cuyo punto más bajo del asiento se sitúe como máximo a 700 mm del nivel del suelo. El ensayo se llevará a cabo en el lado del conductor, salvo cuando existan estructuras laterales asimétricas que puedan afectar al comportamiento en caso de una colisión lateral.

6.1. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE COLISIÓN

6.1.1. TERRENO DE ENSAYO

El área de ensayo será lo suficientemente amplia como para dar cabida al sistema de propulsión de la barrera deformable móvil y para permitir el desplazamiento, tras la colisión. La parte en que tenga lugar la colisión y el desplazamiento del vehículo será horizontal, plana y regular y representativa de una calzada normal, seca y regular.

6.1.2. CONDICIONES DE ENSAYO

El vehículo sometido a ensayo se encontrará inmóvil. La trayectoria del plano medio vertical longitudinal del *bogie* será perpendicular al plano medio vertical longitudinal del vehículo impactado. La velocidad del ensayo del impactador móvil será de 50 km/h.

El ensayo deberá hacerse uso de los cinturones de seguridad o de los otros sistemas de retención especificados para el vehículo. Los cinturones serán de un tipo homologado de conformidad con la Directiva 77/541/CEE e irán montados en anclajes de conformidad con la directiva 76/115/CEE.

6.1.3. CARACTERÍSTICAS DE LA BARRERA DEFORMABLE

Las medidas del carro impactador deben ser las siguientes: la anchura del eje delantero como del eje trasero deberá ser de 1500 mm. La distancia entre ejes del carro será de 3000 mm. La zona de impacto deformable tendrá un ancho de 1500 mm y una altura de 500 mm.

6.2. CÁLCULO DEL *HIC* (*HEAD INJURY CRITERION*)

Las mediciones que se tomarán del accidente será el parámetro *HIC* (*Head Injury Criterion*). Este parámetro, es adimensional, es la combinación entre dos parámetros: la aceleración efectiva a la que se somete y la duración de dicha aceleración. Con estos dos conceptos se definió la siguiente ecuación:

$$(t_2 - t_1) \cdot \left[\frac{1}{(t_2 - t_1)} \cdot \int_{t_1}^{t_2} a \cdot dt \right]^{2.5} \quad \text{Ecuación 6.1}$$

Donde a es la aceleración resultante en el centro de gravedad de la cabeza (m/s^2) dividida entre 9.81 y medida en función del tiempo y filtrada a una clase de frecuencia de 1000 Hz; t_1 y t_2 son dos instantes temporales escogidos al azar que limitan el intervalo entre el contacto inicial de la cabeza y el último instante de contacto. El valor del *HIC* será el máximo de la expresión anteriormente definida.

La aceleración será medida en el centro de gravedad de la cabeza y deberá ser filtrada a 1000 Hz.

La normativa fija un valor límite para la homologación del vehículo del HIC sea inferior a 1000. En la tabla 6.1 se puede observar según el valor del HIC el nivel correspondiente de severidad según el AIS Code y los efectos producidos en el cráneo.

HIC	AIS Code	Nivel Conmoción Cerebral
100-519	1	Dolor de Cabeza o Mareo
520-899	2	Inconsciente menos de 1 hora- Fractura Lineal
900-1254	3	Inconsciente de 1 hora a 6 horas-Aplastamiento del Cráneo
1255-1574	4	Inconsciente de 6 horas a 1 día- Fractura abierta del Cráneo
1575-1799	5	Inconsciente más de 1 día- Gran Hematoma en el cerebro
>1800	6	Imposible sobrevivir

Tabla 6. 1 Nivel de conmoción cerebral según el HIC.

En la siguiente tabla, Tabla 6.2, se puede observar la relación entre el *HIC*, el nivel según el *AIS Code*, la valoración recibida por EuroNCAP y las lesiones cerebrales en el cerebro como en el cráneo.

HIC	AIS Code	Nivel de daño cerebral	Nivel de daño en el cráneo	Valoración EuroNCAP
<150	0/1	Sin conmoción	Sin fractura	Verde
150-500	2	Suave Conmoción	Sin fractura	Verde
500-1800	3/4	Conmoción Severa	500-900 Pequeña Fractura	<650 Verde
				650-767 Amarillo
			900-1800 Gran Fractura	767-883 Naranja
				883-1000 Marrón
				> 1000 Rojo
>1800	5	Coma cerebral	Vida amenazada por la fractura	Rojo

Tabla 6. 2 Nivel de daño craneal según el HIC.

En la figura 6.1 se describe en la gráfica el riesgo de lesión cerebral AIS Code 4 o mayor, es decir, el riesgo de lesión en la cabeza capaz de causar la

muerte del individuo según el HIC medido a 15 ms. Se puede observar que existe un 16 % de posibilidades de sufrir este nivel de lesiones cerebrales.

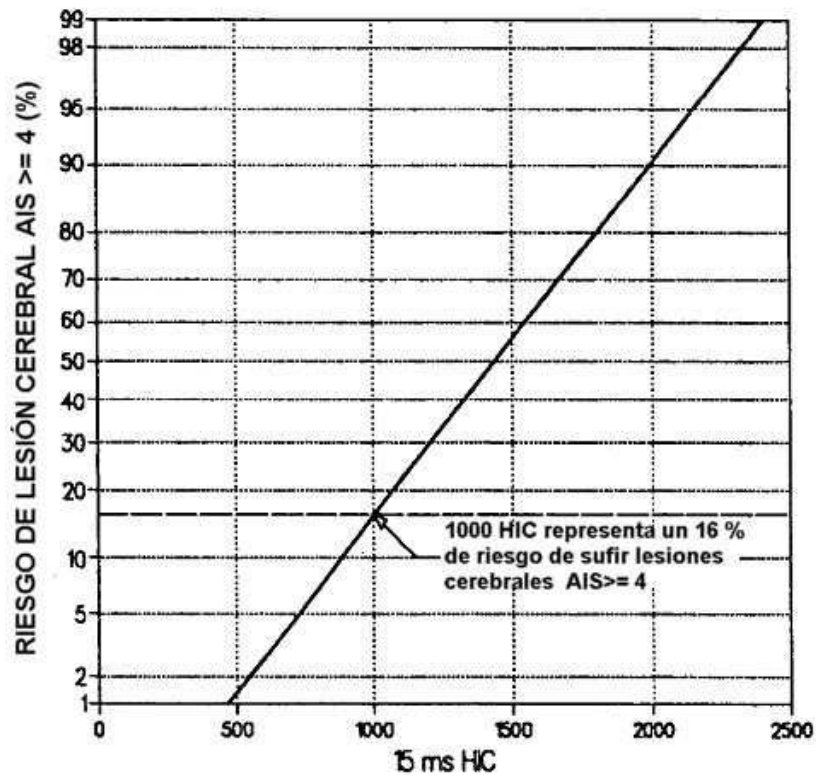


Figura 6. 1 Gráfica del riesgo de lesión cerebral con AIS >=4.

7 MODELOS EMPLEADOS EN LA SIMULACIÓN

Los modelos de este proyecto son utilizados para la simulación mediante ordenador de un impacto lateral entre dos vehículos y la inclusión de un *dummy* sin cinturón en el asiento del piloto [25].

Los modelos han sido desarrollados por la National Crash Analysis Center, y se pueden encontrar en su página web. Con estos análisis se consiguen grandes avances en la seguridad vial de los coches, ya que, al hacer las pruebas de ensayo organismos independientes y publicar los resultados obtenidas en ellas, las marcas de la industria automovilística intenta mejorar sus sistemas de seguridad en el coche debido a que una buena calificación de las agencias que se encargan de realizar estos ensayos incrementa el nivel de ventas de la marca en cuestión [4].

En este proyecto se simula el impacto lateral entre dos vehículos. La simulación se lleva a cabo mediante tres entidades que son coche a estudiar, carro impactador y *dummy*. El sistema de coordenadas, en el proyecto es el siguiente:

- Eje X: Esta situado en el sentido positivo de la dirección de la marcha del vehículo que va a ser impactado.
- Eje Y: Define la dirección de la dirección del carro impactador.
- Eje Z: Está situado a lo largo de la vertical con sentido positivo hacia arriba.

Debido a que Ls-Dyna es un programa adimensional habrá que prestar una importante atención a todas las unidades que intervienen en la simulación y por lo tanto deben ser coherentes entre sí [26].

En la tabla 7.1 se muestra el criterio de unidades que se ha seguido en esta simulación.

Magnitud	Unidad
Longitud	Milímetro (mm)
Tiempo	Segundo (s)
Masa	Tonelada (t)
Fuerza	Newton (N)
Tensión	Megapascuales (Mpa)

Tabla 7. 1 Criterio de unidades.

7.1. EL VEHICULO

El vehículo que ha sido utilizado en la simulación del impacto es la versión americana del Suzuki Cultus, es decir, el Geo Metro desarrollado por la NCAC en el año 2000. En la figura 7.1 se muestra una imagen del vehículo [4].

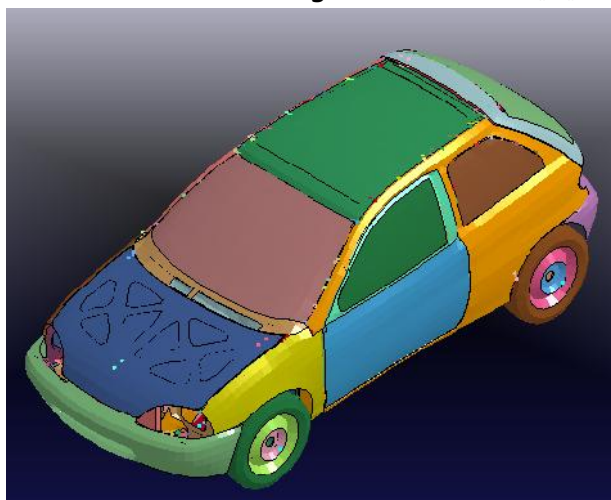


Figura 7. 1 Imagen del vehículo utilizado en la simulación

7.1.1. GEOMETRÍA

El modelo tiene 209 partes, casi todos los elementos están modelados con elementos tipo SHELL. En el modelo se pueden diferenciar partes del coche tales como: techo, suelo del coche, motor, puertas, pilares delanteros, pilares medios, pilares traseros, ventanas, ruedas, frenos etc. En menor medida también hay elementos tipo SOLID, MASS, DISCRETE y BEAM.

El modelo viene sin asientos, imprescindibles para la situación del *dummy*, por lo que para la inclusión de los asientos se utilizan los asientos del Ford Taurus ya que sus dimensiones son las que mejores se adaptaban a este modelo.

En la tabla 7.2 se muestran algunos datos del vehículo empleado en la simulación.

Longitud	3585 mm
Distancia entre ejes	2245 mm
Anchura	1530 mm

Tabla 7. 2 Datos del vehículo.

7.1.2. MATERIALES

El material que ha sido empleado en la mayoría de los elementos de los vehículos es el PIECEWISE LINEAR PLASTICITY. Este material tiene un comportamiento elasto-plástico, es decir, si se es sometido a un esfuerzo de tracción se comporta linealmente hasta llegar a un cierto punto que es el límite elástico y a partir desde ese punto se pierde la linealidad entre la tensión y la deformación. A partir de este punto al perder la linealidad, el material sufre grandes deformaciones y puede absorber mayores cantidades de energía [27].

En la tabla 7.3 se muestran algunos valores de este material anteriormente descrito.

Densidad (t/mm^3)	$7,89 \cdot 10^{-9}$
Módulo de elasticidad (Mpa)	$2,1 \cdot 10^5$
Coefficiente de Poisson	0,3

Tabla 7. 3 Valores del material PIECEWISE LINEAR PLASTICITY.

7.1.3. GRAVEDAD

El valor de la gravedad ha sido introducido en el programa mediante el comando LOAD BODY Z, ya que es el eje en el que se aplica la gravedad. El valor de la aceleración es de 9810 mm/s^2 y se introduce como un valor constante en todos los instantes de tiempo.

7.1.4. ASIENTOS

Como se ha comentado anteriormente los asientos se importan desde otro modelo, en concreto, el Ford Taurus. La única función de los asientos es soportar el peso del *dummy*. Una vez importados los siguientes pasos son los siguientes:

- El primer paso es situarlos en el sitio adecuado mediante el comando del programa TRANSLATE, este comando sirve para mover entidades dentro de la simulación. En la figura 7.2 se muestran los asientos del Ford Taurus.

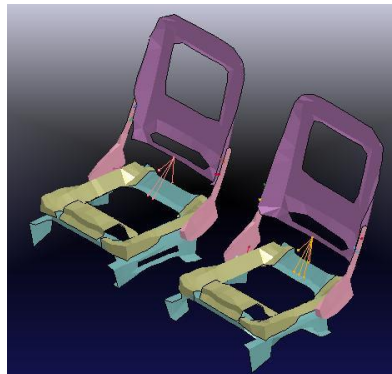


Figura 7. 2Asientos del Ford Taurus.

- El segundo paso es unirlos al coche para que se muevan igual que el vehículo. Este paso ha sido posible mediante el uso del comando CONSTRAINED NODAL RIGID BODIE (CNRB), este comando simula la unión de los asientos del coche al suelo mediante tornillos.
- Por último, hay que incluir los asientos en la PART 5 que es la parte definida en el programa que compone la totalidad del vehículo. Esta operación se ha realizado mediante el comando SET PART, con este comando se agrupan todas las partes en un mismo conjunto. En la figura 7.3 se muestra el vehículo con los asientos ya incluidos en el modelo.

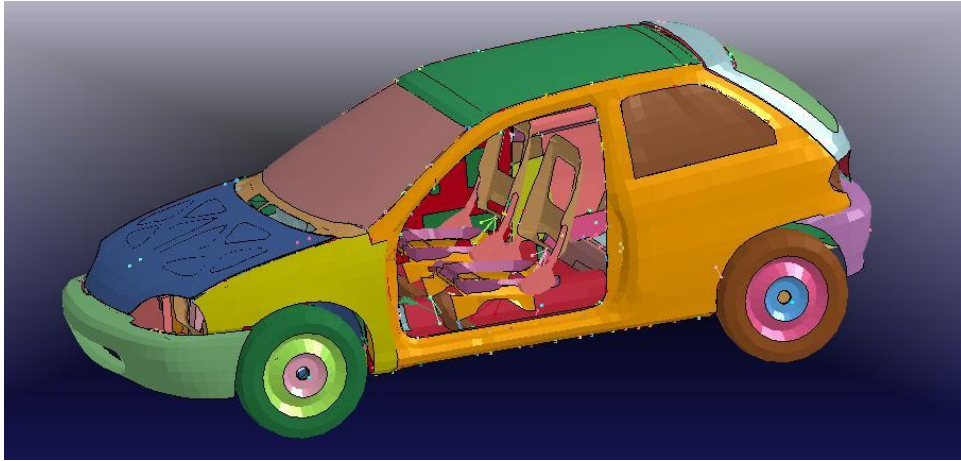


Figura 7. 3 Vehículo con los asientos incluidos.

7.1.5. ACELERÓMETROS

Los acelerómetros son los encargados de obtener los valores de las aceleraciones durante la simulación del caso a estudiar. El vehículo tiene un acelerómetro situado en el centro de gravedad del vehículo. La información podrá verse durante el proceso de post-procesado.

7.2. BOGIE

El modelo empleado ha sido descargado de la página web de la NCAC. Este modelo hubo que hacerle unas modificaciones para que cumpliera los requisitos europeos de la normativa. En la figura 7.4 se observa el *bogie* descargado de la página web.

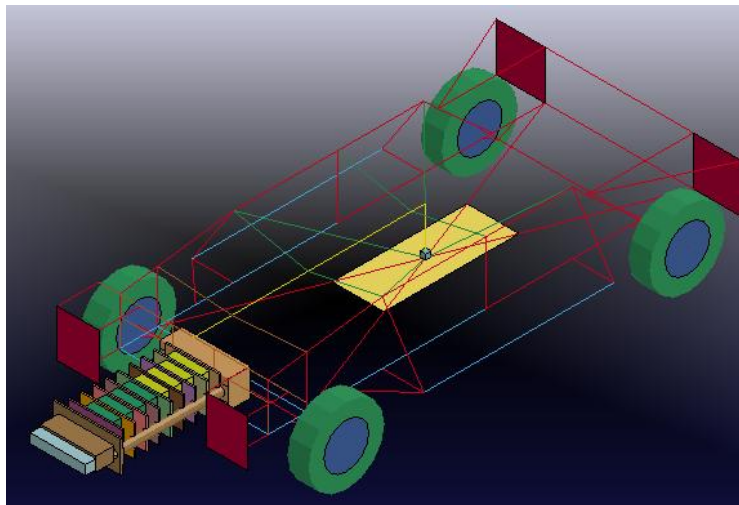


Figura 7. 4 Bogie inicial.

Se observa en la figura que el impactador del *bogie* es muy pequeño por lo que hay que redimensionarlo para cumplir la normativa.

El proceso de redimensionado es el siguiente:

- El primer paso es eliminar la pieza original.
- Se crean dos placas para simular el *bogie* con las características descritas anteriormente en la sección 6. Las dimensiones finales del nuevo impactador son de 1500 mm. de ancho y 500 mm. de altura.
- Se les asigna a cada placa un material diferente mientras que la sección permanece la misma para los dos casos. La sección para las dos placas es una sección tipo SOLID. El material elegido para la placa que se apoya en las guías deslizantes es un material tipo RIGID (ver propiedades en tabla 7.4) mientras el material que se le asigna a la placa que va impactar sobre el coche es un material HONEYCOMB (ver propiedades en tabla 7.5).

Material RIGID	
Densidad (t/mm^3)	$2,36 \cdot 10^{-9}$
Módulo de elasticidad (Mpa)	$2,1 \cdot 10^5$
Coeficiente de Poisson	0,3

Tabla 7. 4 Propiedades del material RIGID.

Material HONEYCOMB	
Densidad (t/mm^3)	$1,6 \cdot 10^{-11}$
Módulo de elasticidad (Mpa)	$6,9 \cdot 10^4$
Coeficiente de Poisson	0,33

Tabla 7. 5 Propiedades del material HONEYCOMB.

- Para la unión entre la placa y la guía deslizante, se ha hecho mediante la utilización del comando `CONSTRAINED_RIGID_BODIES`, este comando se utiliza para que los dos cuerpos se muevan solidariamente. Por último falta la unión entre las dos placas se realiza mediante un contacto `AUTOMATIC SURFACE TO SURFACE`, en la figura 7.5 se observa una imagen de la parte que impacta sobre el coche.

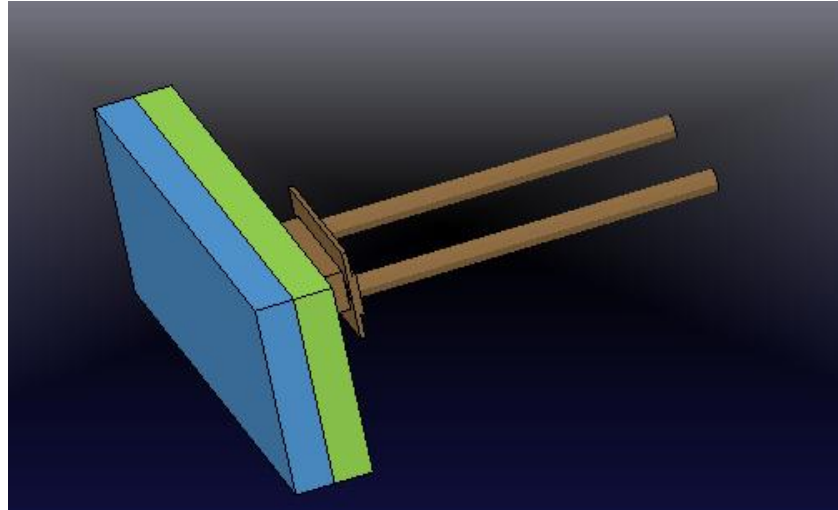


Figura 7. 5 Impactador escalado.

7.2.1. GEOMETRÍA

El modelo es una simplificación del carro impactador que se utiliza en los ensayos físicos de choques. Esta simplificación ahorra un gran tiempo en el cálculo computacional de la simulación. El modelo está compuesto por 4515 nodos.

Las partes que componen este modelo son 27 partes, entre estas partes se encuentran las ruedas del *bogie*, las placas impactadoras, las guías deslizantes, etc. En la tabla 7.6 se observan las medidas principales del carro impactador.

Batalla (mm)	2500
Ancho de vías (mm)	1680

Tabla 7. 6 Dimensiones bogie.

El modelo se compone de 2906 elementos, la mayor parte de los elementos son tipo SOLID, también encontrando elementos tipo SHELL, BEAM, SEATBELT ACCELEROMETER. En la figura 7.6 se ve una imagen del *bogie*.

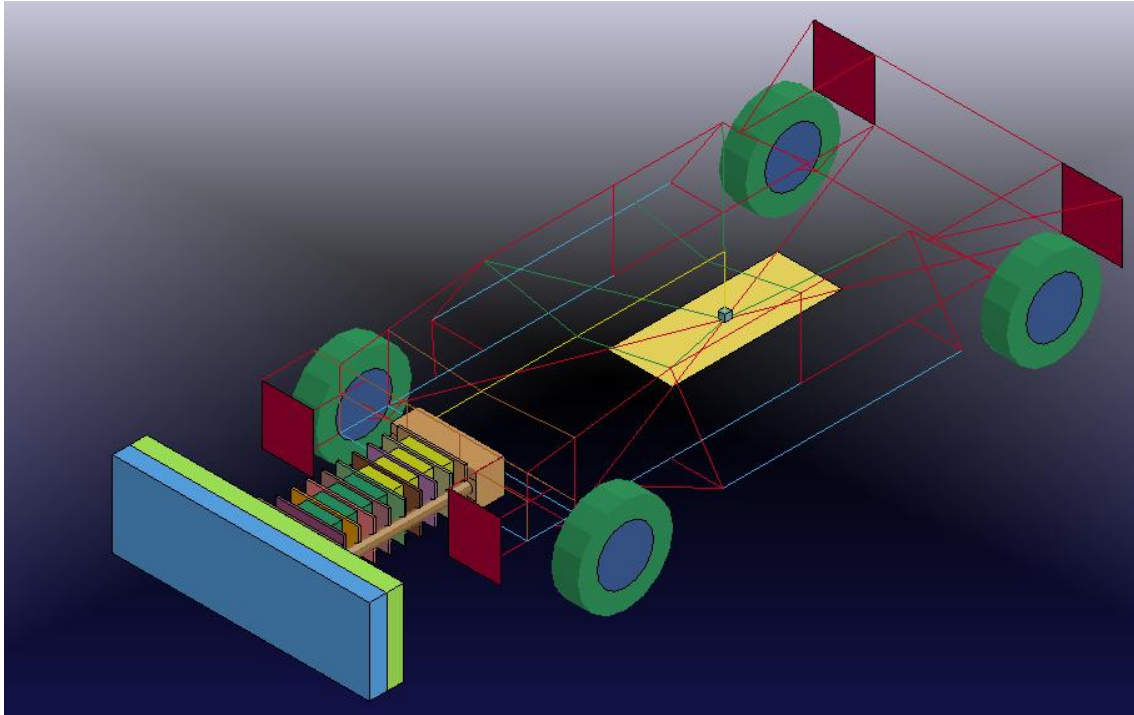


Figura 7. 6 Imagen final del bogie.

7.2.2. MATERIALES

El material de la estructura autoportante que simula la carrocería del *bogie* es de un material ELASTIC y las características de este material se pueden ver en la tabla 7.7.

Material ELASTIC	
Densidad (t/mm^3)	$1,06 \cdot 10^{-9}$
Módulo de elasticidad (Mpa)	2462
Coeficiente de Poisson	0,323

Tabla 7. 7 Propiedades del material ELASTIC.

El material de la secciones SOLID es el un material RIGID de las mismas características que el material RIGID anteriormente descrito en la tabla 7.4. Por último falta por describir el material HONEYCOMB para la chapa que impacta con el coche, las características de este material están explicadas en la tabla 7.5.

7.2.3. VELOCIDAD

En LS-Dyna la velocidad puede ser definida de diferentes maneras, dando velocidad a todos sus nodos, por partes o por elementos. En este caso, se creó una parte de todo el *bogie*, esta parte ha sido creada mediante el comando SET_PART.

Para asignarle la velocidad se ha hecho uso del comando INITIAL_VELOCITY_GENERATION a la parte que hemos creado anteriormente. Se ha asignado una velocidad de 13888. El valor de la velocidad es de 50 km/h pero para ser consecuentes con el criterio de unidades anteriormente explicado se pone la velocidad en mm/s por eso se le asigna este valor.

7.2.4. GRAVEDAD

El valor de la aceleración es de 9810 mm/s^2 y se introduce como un valor constante en todos los instantes de tiempo. Este valor ha sido introducido en el programa mediante la función es LOAD_BODY_Z.

7.2.5. ACELERÓMETROS

El carro impactador tiene dos acelerómetros, de los cuales uno se encuentra en el centro de gravedad del carro impactador mientras que el otro se encuentra en las guías deslizantes del carro impactador. Los acelerómetros recogerán los valores de la aceleración que se produzca durante la simulación.

7.3. DUMMY

El *dummy* empleado en la simulación es el modelo USSID versión 4.2. Este modelo ha sido creado para la simulación de choques laterales, este modelo ha sido desarrollado por Livermore Software Technology Corporation.

El modelo está compuesto por 43871 nodos. El modelo es único para choques laterales ya que no incluye en el modelo la inclusión de algunas partes del cuerpo como los brazos. En la figura 7.6 se ve una imagen del *dummy*.

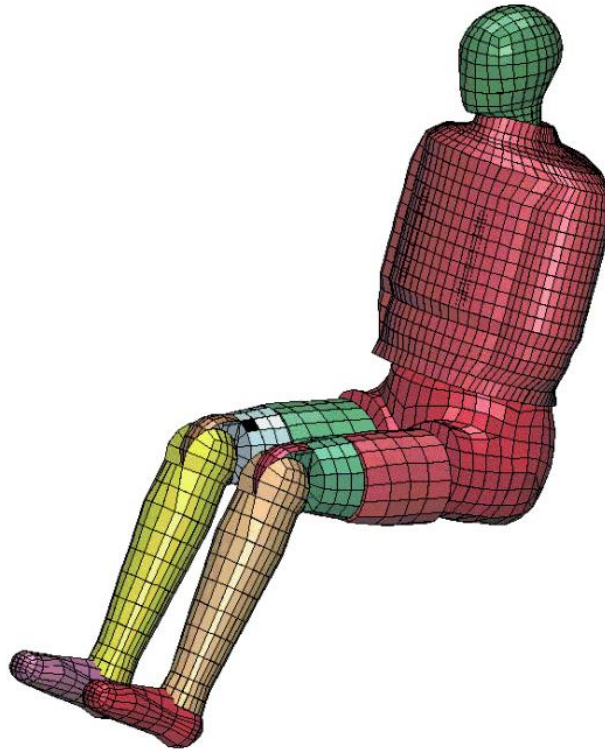


Figura 7. 7 Dummy utilizado en la simulación.

7.3.1. GEOMETRÍA

El modelo está compuesto de 70 partes, entre las que podemos destacar la cabeza, la pelvis, el tórax (en él vienen incluido los brazos), piernas, pies, etc.

En el modelo existen 57040 elementos, de los cuales 41517 son elementos tipo SOLID, 12803 son elementos tipo SHELL, 6 son SEATBELT ACCELEROMETER, 2712 son elementos tipo BEAM y por último existen en el modelo 2 elementos tipo DISCRETE. En la figura 7.8 se ve una vista frontal del *dummy* utilizado en la simulación.



Figura 7. 8 Vista frontal del dummy utilizado en la simulación.

7.3.2. MATERIALES

Para modelar los materiales se han utilizados cuatro tipos de materiales según el tipo de elemento que fuera. Para los elementos más blandos se ha utilizado el material FU CHANG FOAM. Estos materiales tienen una densidad que varía entre $4,41 \cdot 10^{-11} \text{ t/mm}^3$ y $1,23 \cdot 10^{-10} \text{ t/mm}^3$, el modulo de Young permanece igual para todos los materiales tipo FOAM siendo su valor 20 MPa.

Otro tipo de material usado el MOONEY RIVLIN RUBBER. Este material se ha usado para los materiales parecidos al caucho. En la tabla 7.8 se observan los valores de las magnitudes que definen este material.

Material MOONEY RIVLIN RUBBER	
Densidad (t/mm^3)	$1,06 \cdot 10^{-9}$
Coefficiente de Poisson	0,495

Tabla 7. 8 Propiedades del material MOONEY RIVLIN RUBBER.

Por último los demás materiales empleados en el modelo del *dummy* son materiales tipo ELASTIC y tipo RIGID. En la tabla 7.9 y en la tabla 7.10 se aprecian los valores característicos de estos dos materiales.

Material RIGID	
Densidad (t/mm^3)	$1 \cdot 10^{-11} - 7.79 \cdot 10^{-9}$
Módulo de elasticidad (Mpa)	$5 - 2,073 \cdot 10^5$
Coeficiente de Poisson	0,28-0,45

Tabla 7. 9 Propiedades del material RIGID.

Material ELASTIC	
Densidad (t/mm^3)	$1 \cdot 10^{-9} - 7.79 \cdot 10^{-9}$
Módulo de elasticidad (Mpa)	$8 - 2,073 \cdot 10^5$
Coeficiente de Poisson	0,3-0,45

Tabla 7. 10 Propiedades del material ELASTIC.

7.3.3. GRAVEDAD

La gravedad como en los casos anteriores para el *bogie* y el coche ha sido introducida en el programa con el comando LOAD BODY Z y asignándola un valor de 9810 mm/s^2 .

7.3.4. ACELERÓMETROS

El modelo del *dummy* tiene 5 acelerómetros, que están dispuestos en el tórax, tres de ellos, otro en la zona abdominal y otro en la pelvis, por lo que falta un acelerómetro en la cabeza ya que es en el punto donde se registraran todos los valores de la aceleración de la simulación.

Para crearse el acelerómetro en la cabeza, han sido necesarios la creación de tres nuevos nodos, cada uno de estos nodos pertenece a un eje de referencia local. Estos nodos están situados en el centro de gravedad de la cabeza que es donde se calculará el parámetro HIC para estudiar la severidad del choque.

Utilizando el comando SEATBELT ACCELEROMETER, comando utilizado para crear acelerómetros, dentro del apartado ELEMENT se seleccionan los tres nodos anteriormente creados para definir la dirección de los ejes locales de este nuevo acelerómetro como los ejes globales previamente explicados.

Finalmente se hace un SET NODE, este comando sirve para crear un conjunto de nodos, a los tres nodos creados, con este SET NODE creado, se hace un CONSTRAINED EXTRA NODE SET con este trío de nodos para que se muevan igual que la cabeza del *dummy*. En la figura 7.9 se observa una imagen del *dummy* con todos sus acelerómetros.

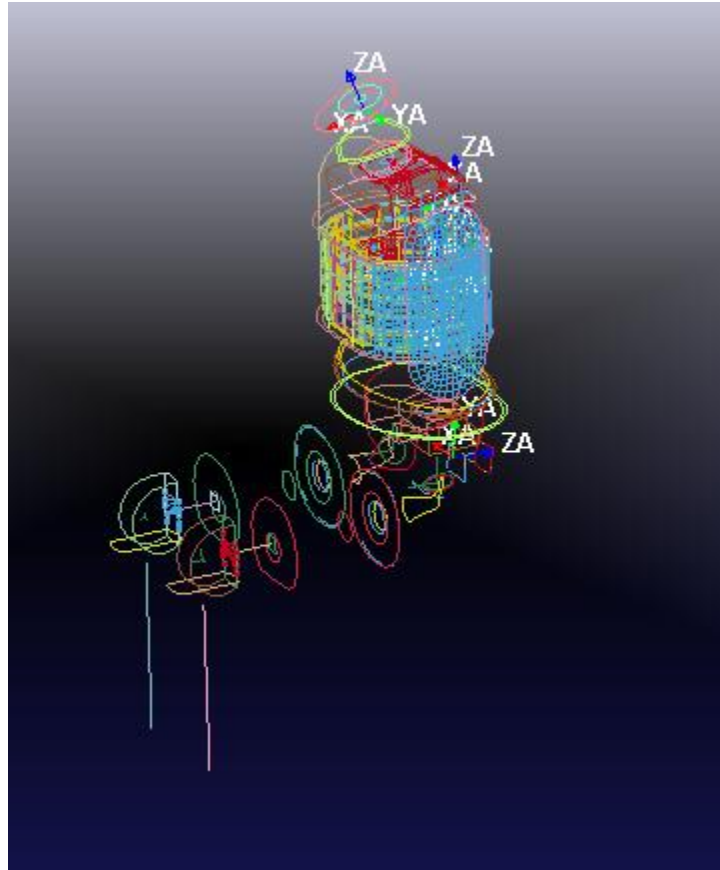


Figura 7. 9 Dummy con todos sus acelerómetros.

7.4. REGIONES DE CONTACTO

Para la correcta realización de la simulación es fundamental proporcionar al modelo las claves de la interacción entre las diferentes partes que lo forman. Para definir todos los contactos se hace uso del comando del programa CONTACT.

Una buena definición de los contactos es muy importante ya que cuanto mejor se aproxima el modelo a la realidad, los resultados serán más parecidos a los que se obtendrían mediante a los ensayos físicos. Los contactos son tan importantes en el caso de las colisiones debido a que en estas colisiones se producen grandes deformaciones. Todos los coeficientes de rozamiento han sido

introducidos con estos valores por la literatura que ha sido consultada para la realización de este proyecto [28].

A continuación se definen todos los contactos utilizados en el modelo.

7.4.1. CONTACTOS DEFINIDOS EN EL COCHE

El contacto que ha sido utilizado para la unión de todas las partes del coche ha sido CONTACT AUTOMATIC SINGLE SURFACE.

Este contacto no tiene una superficie maestra definida ya que siempre tiene en cuenta el espesor de los materiales tipo SHELL. En el proceso de modelado, para asegurarse el correcto funcionamiento del contacto y evitar la penetración inicial, se han diseñado los elementos con una pequeña separación entre ellos.

Como el modelo no lleva incluido los asientos, han tenido que ser incluidos en este contacto para la correcta realización de la simulación, esto ha sido posible gracias a la inclusión de los asientos en el SET PART 5, este SET PART es el conjunto de todas las partes del coche.

7.4.2. CONTACTOS DEFINIDOS EN EL DUMMY

Existe un contacto entre todas las partes del *dummy*, este contacto está definido por el CONTACT AUTOMATIC SINGLE SURFACE. Este contacto es igual que el definido anteriormente para todas las partes del coche.

Existe también otro contacto en el lado izquierdo del tórax del *dummy*, es decir, donde va a sufrir el impacto con la puerta cuando el carro impactador choque con el vehículo. Este contacto es un AUTOMATIC GENERAL, este contacto trata a todos los elemento de forma automática y simplifica los cálculos que tiene que realizar LS-Dyna a la hora de realizar la simulación.

El coeficiente de rozamiento estático toma un valor de 0.4 mientras que el coeficiente de rozamiento dinámico obtiene un valor de 0.35. A partir de estos dos coeficientes y la velocidad relativa entre las dos superficies se obtiene el coeficiente de rozamiento total, con la siguiente ecuación:

$$\mu = \mu_D + (\mu_E - \mu_D)^{-DC \cdot |V_{rel}|} \quad \text{Ecuación 7.1}$$

Donde μ es el coeficiente de rozamiento total, μ_D es el coeficiente de rozamiento dinámico y μ_E es el coeficiente de rozamiento estático. Mientras que DC es una constante que se define para cada tipo de contacto. La V_{rel} es la velocidad entre las dos superficies. En este caso como la velocidad relativa entre las dos partes del *dummy* es 0 por lo que el coeficiente de rozamiento total es igual a 0.4.

7.4.3. CONTACTOS DEFINIDOS EN EL *BOGIE*

Como se ha explicado anteriormente debido al proceso de cambiar las dimensiones del *dummy* para que se adapte a la normativa europea.

Para este contacto se ha utilizado un contacto AUTOMATIC SURFACE TO SURFACE siendo la parte esclava la parte que va a impactar con el coche mientras que la parte maestra ha sido la parte RIGID, es decir la parte que se une a las guías deslizantes.

El valor del coeficiente de rozamiento estático es de 0.8 y el coeficiente de rozamiento dinámico tiene un valor de 0.4. Este coeficiente está definido por la ecuación 7.1

7.4.4. CONTACTOS DEFINIDOS ENTRE EL COCHE Y EL *BOGIE*

El contacto entre el *bogie* y el coche ha sido definido mediante el comando CONTACT AUTOMATIC SURFACE TO SURFACE.

Para definir este contacto primero ha sido necesaria la creación de dos SET PART que cada uno agrupara a cada conjunto de partes de cada modelo. El SET PART número 5 es el SET PART que incluye a todo el vehículo mientras que el SET PART número 2000003. A estos dos SET PART es los que ha sido incluido en el contacto.

Gracias a la ecuación 7.1, se hallan los siguientes coeficientes de rozamientos. El coeficiente de rozamiento estático toma un valor de 0.8 mientras que el coeficiente de rozamiento dinámico obtiene un valor de 0.4.

7.4.5.CONTACTOS DEFINIDOS ENTRE EL COCHE Y EL DUMMY

Entre el coche y el *dummy* existen dos contactos, uno de ellos entre el *dummy* y la carrocería del coche que entrará en contacto cuando el *dummy* choca con la puerta. El otro contacto existente es entre el *dummy* y los asientos.

Para el primer contacto ha sido definido mediante un contacto AUTOMATIC SURFACE TO SURFACE. También ha sido necesaria la creación de un SET PART para agrupar todas las partes del *dummy*.

El otro SET PART ya ha sido creado anteriormente para la realización del contacto entre el *bogie* y el coche. EL valor del coeficiente de rozamiento estático tiene un valor de 0.4 mientras que el coeficiente de rozamiento dinámico tiene un valor de 0.2

El contacto entre los asientos ha sido creado mediante el comando RIGID ONE WAY TO RIGID BODY. Este comando calcula los esfuerzos tangenciales al plano del contacto a partir del rozamiento producido entre superficies.

Para la correcta aplicación del contacto es necesario la definición de una curva que define la relación entre la fuerza normal y la máxima penetración de cualquiera de los nodos. En la figura 7.10 se observa la gráfica que define este comportamiento.

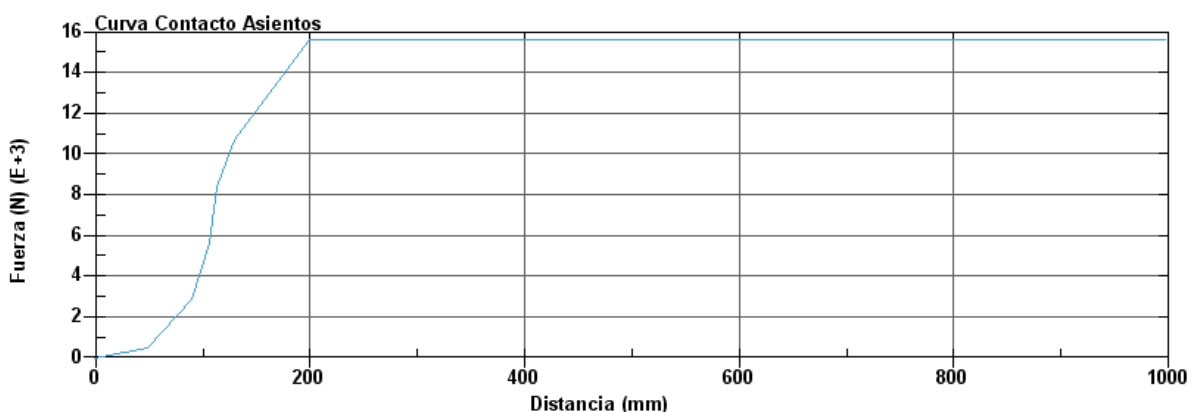


Figura 7. 10 Curva contacto asientos.

7.4.6. CONTACTOS DEFINIDOS ENTRE EL COCHE Y EL *BOGIE* CON EL SUELO

El primer paso para realizar el contacto entre el coche y el *bogie*, es realizar el suelo mediante el comando RIGIDWALL PLANAR. Se ha tenido cuidado para que no existiera penetración entre las ruedas del coche y el *bogie* con el suelo.

Se han realizado dos contactos uno de ellos con las cuatro ruedas del coche y otro con las cuatro ruedas del *bogie*. El coeficiente de rozamiento es igual para ambos contactos y toma un valor de 0.8.

8 RESULTADOS

Tras realizar el ensayo de choque lateral de dos vehículos con la inclusión de un *dummy* sin cinturón, se registran una gran cantidad de datos acerca de las lesiones producidas en el *dummy*, ya que es donde se centra este proyecto. En este caso se toman valores en el acelerómetro puesto en el centro de gravedad de la cabeza anteriormente. Gracias a este acelerómetro se puede calcular el parámetro HIC (HEAD INJURY CRITERION), parámetro previamente explicado en capítulo 6.

Para poder trabajar con estos datos, se ha ejecutado el archivo de la implementación, hecho por Ls-PrePost, con el programa LS-Dyna. Los datos son recogidos mediante el programa con un intervalo de tiempo anteriormente definido. Los ficheros creados por LS-Dyna se llaman Bynary Plot, con esos ficheros al pasarlos al post-procesador, es decir, Ls-PrePost se podrán visualizar todos los datos que se hayan marcado para registrarlos, como en este caso la aceleración, la velocidad, etc.

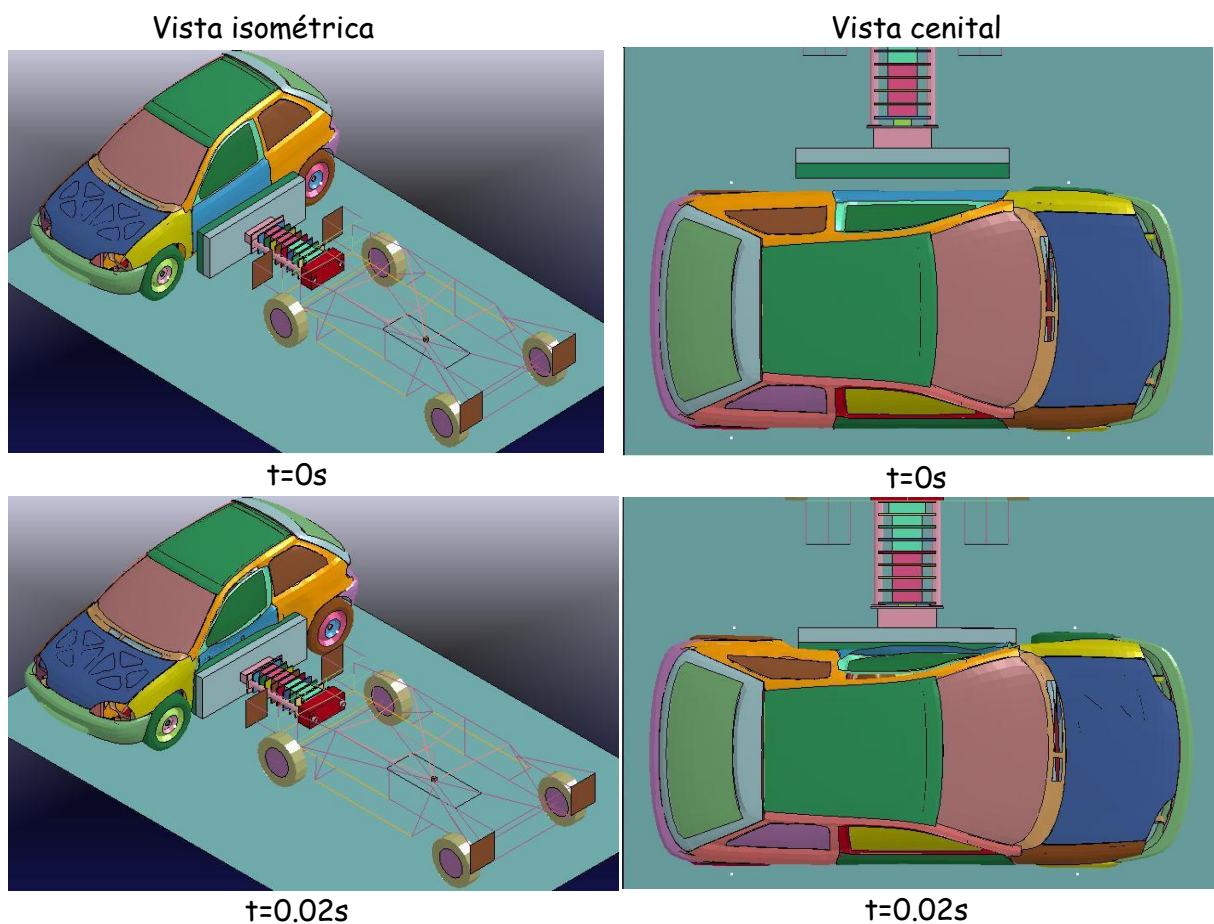
En esta simulación se ha ejecutado la simulación de un impacto lateral entre dos vehículos con la presencia en el interior del vehículo de un *dummy* sin cinturón de seguridad.

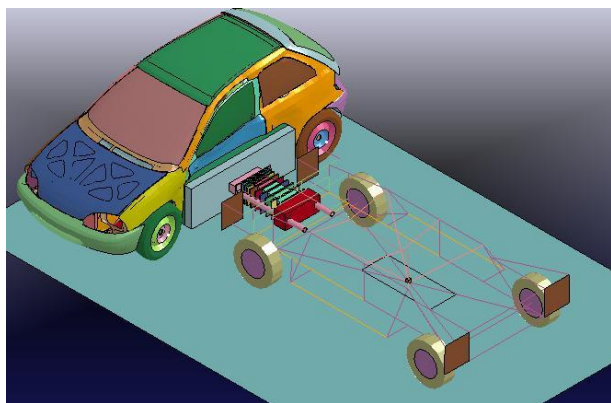
8.1. CASO: ENSAYO DE CHOQUE LATERAL CON UN DUMMY SIN CINTURÓN.

Este caso simula el choque lateral entre dos vehículos. El intervalo de tiempo en el que se realiza el choque es de 120 ms, obteniéndose resultados cada 5 ms. La simulación se ha llevado a cabo con la versión LS-DYNA 970. El tiempo de cálculo han sido 3,5 horas llevadas a cabo por el siguiente ordenador Intel Core 2 Duo a 2.13 GHz con una memoria RAM de 3 GB.

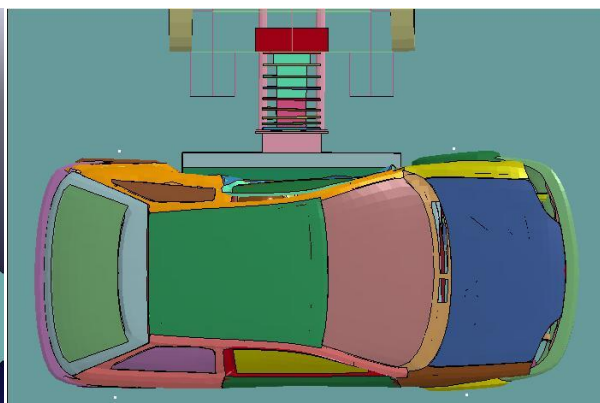
En la tabla 8.1, se muestra varias secuencias del choque, correspondientes cada una de ellas a diferentes puntos de vista del choque.

Tabla 8. 1 Secuencia del choque desde el exterior.

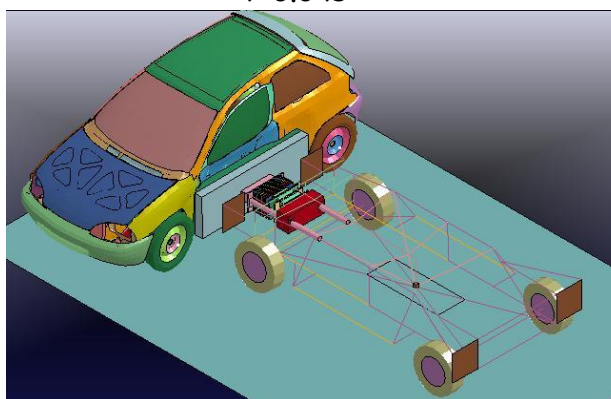




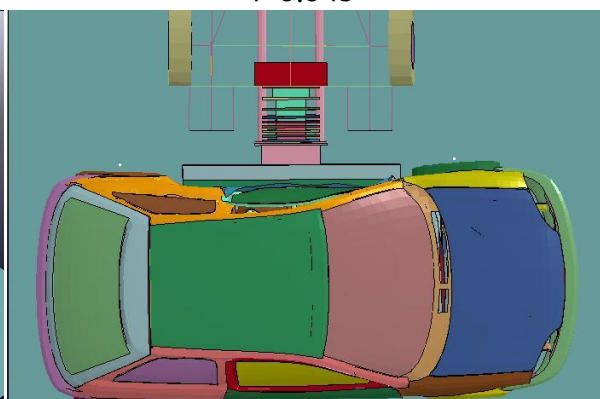
$t=0.04s$



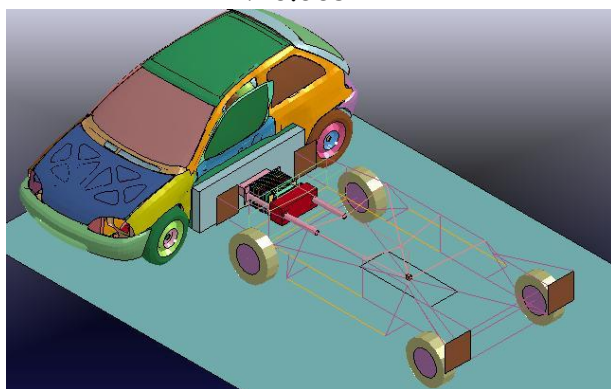
$t=0.04s$



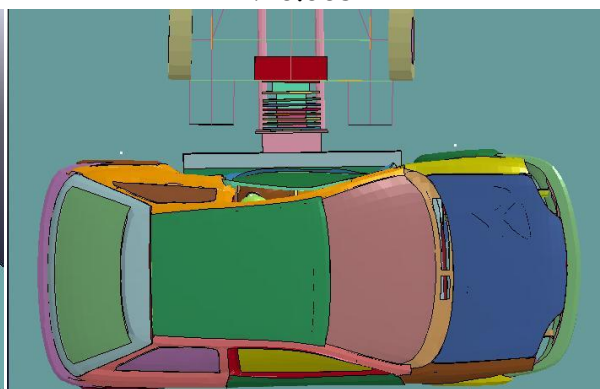
$t=0.06s$



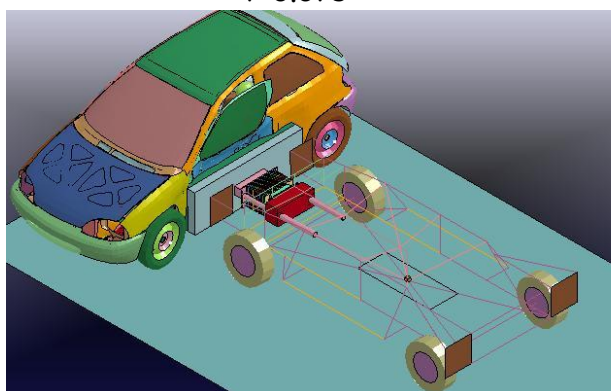
$t=0.06s$



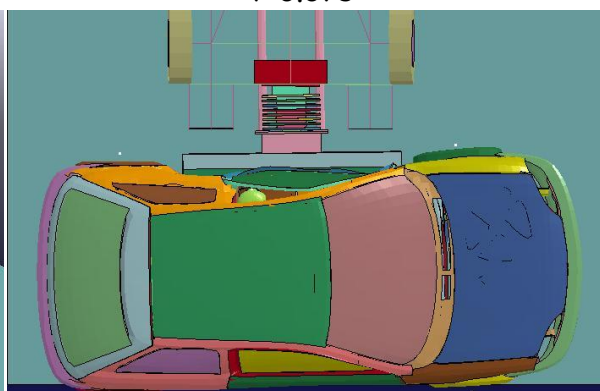
$t=0.07s$



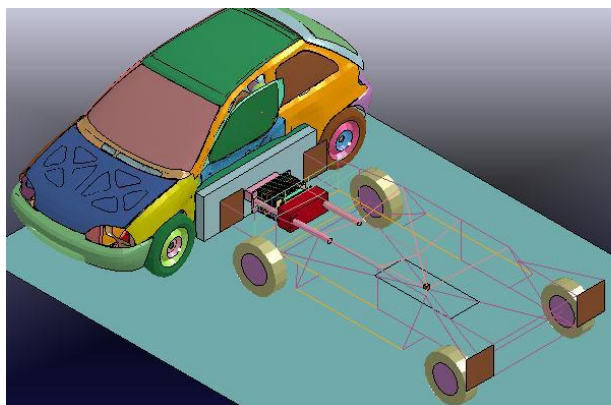
$t=0.07s$



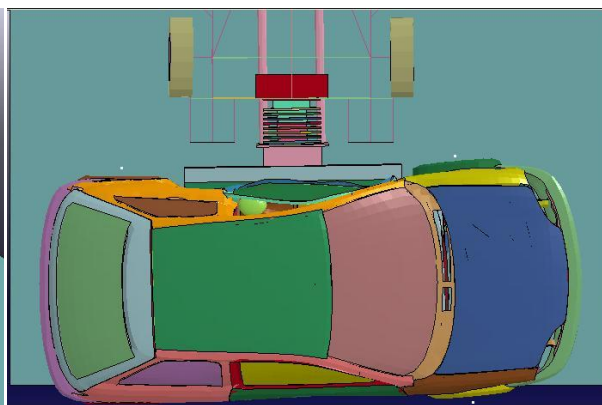
$t=0.08s$



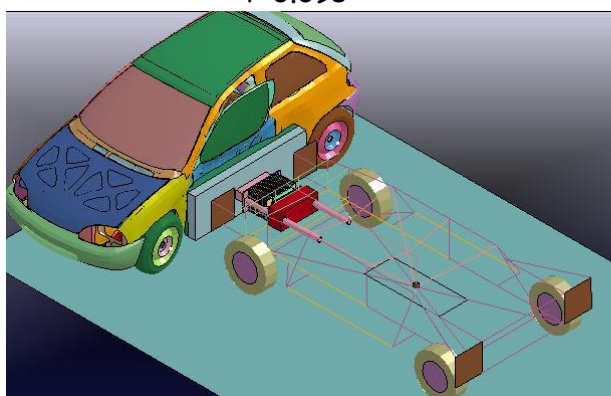
$t=0.08s$



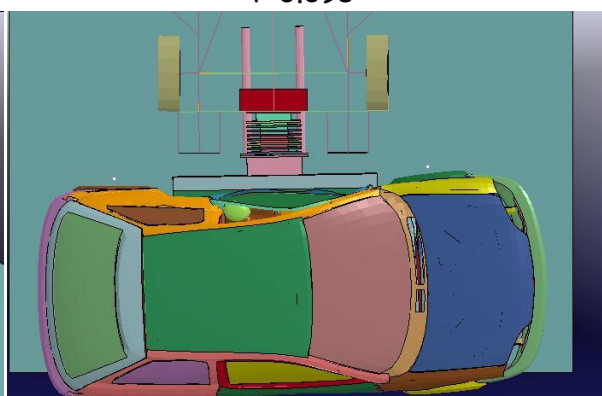
$t=0.09s$



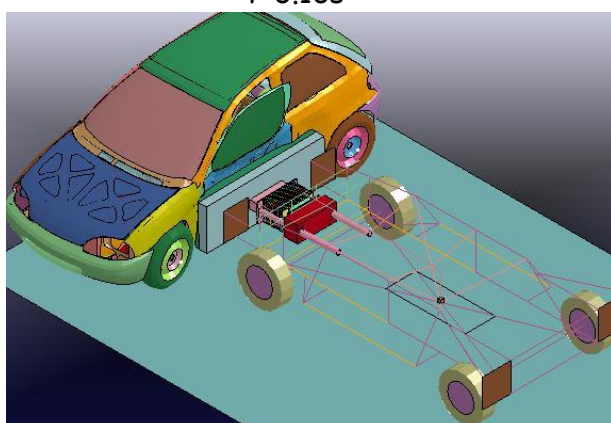
$t=0.09s$



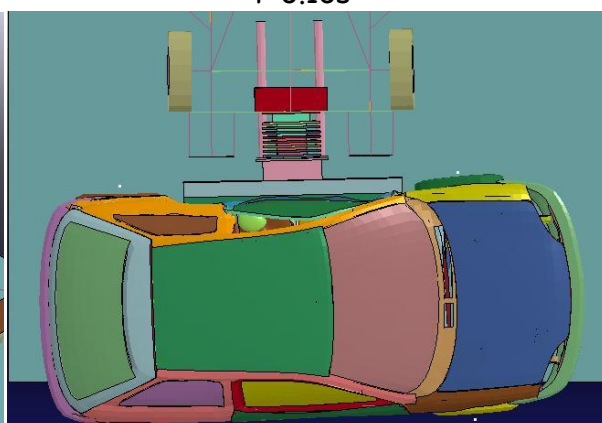
$t=0.10s$



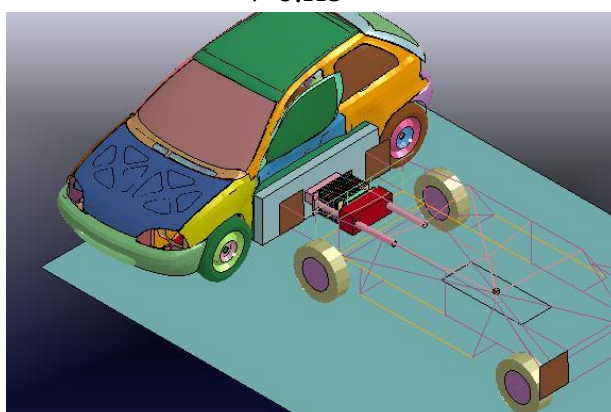
$t=0.10s$



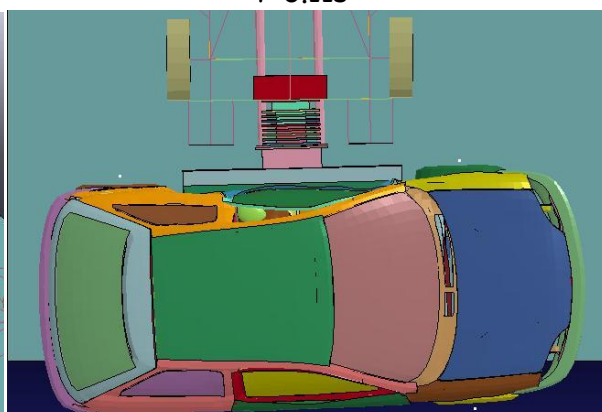
$t=0.11s$



$t=0.11s$



$t=0.12s$

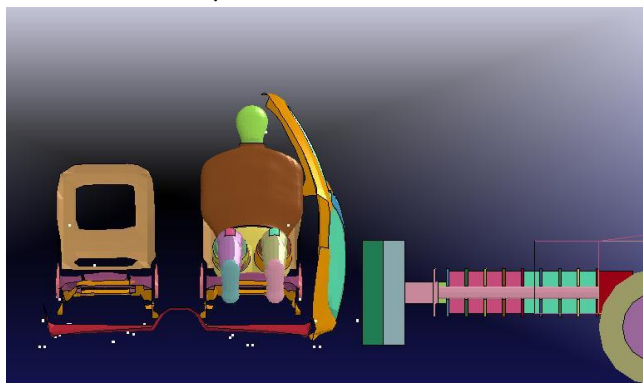


$t=0.12s$

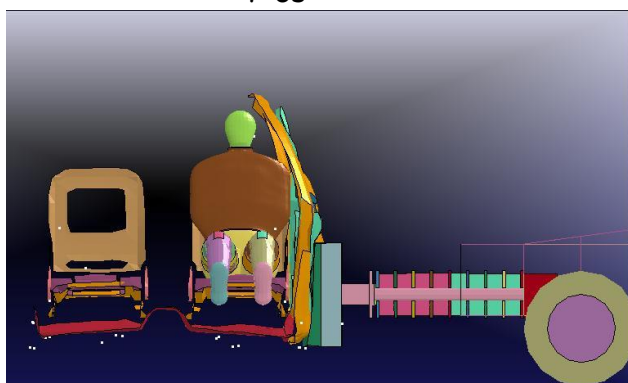
En la tabla 8.2, se puede observar los daños sufridos por el *dummy* en la simulación del choque lateral.

Tabla 8. 2 Secuencia del choque vista desde el interior del vehículo.

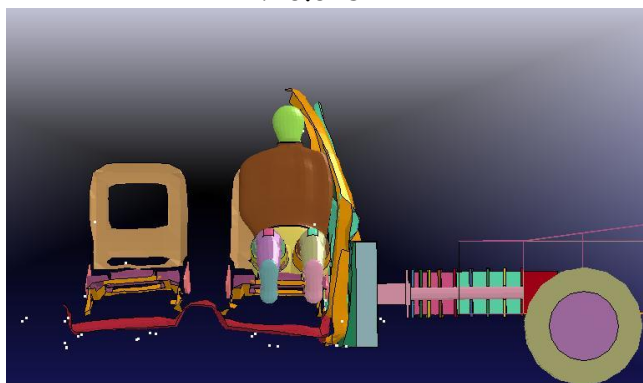
Vista frontal interior



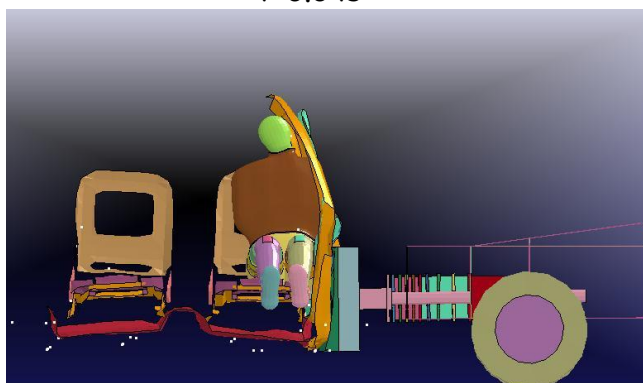
t=0s



t=0.02s



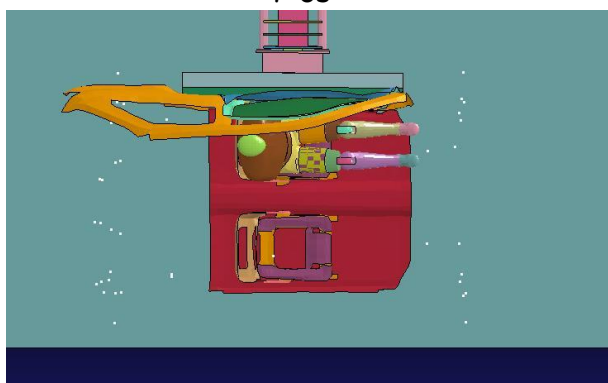
t=0.04s



Vista cenital interior



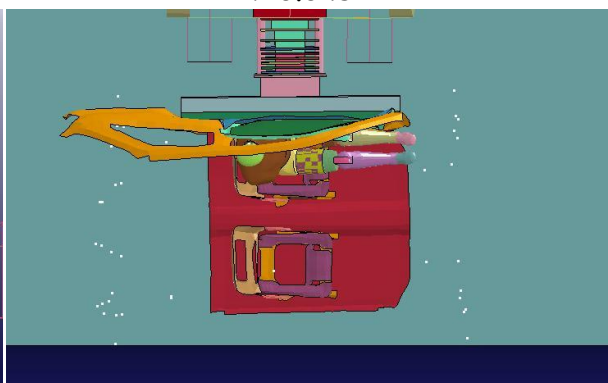
t=0s



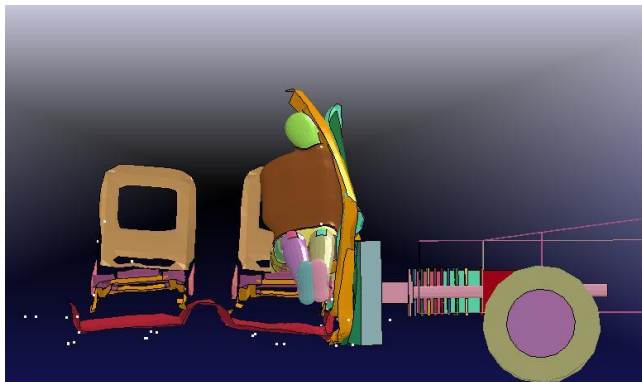
t=0.02s



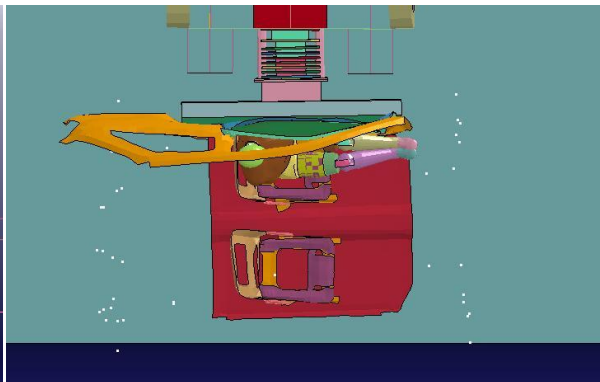
t=0.04s



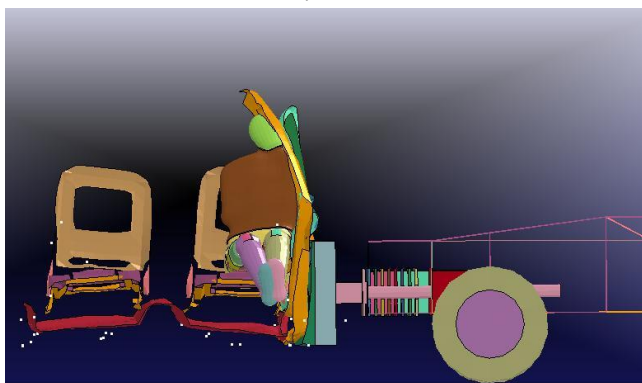
$t=0.06s$



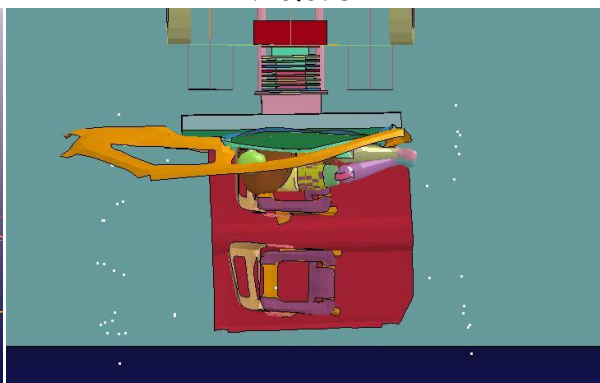
$t=0.06s$



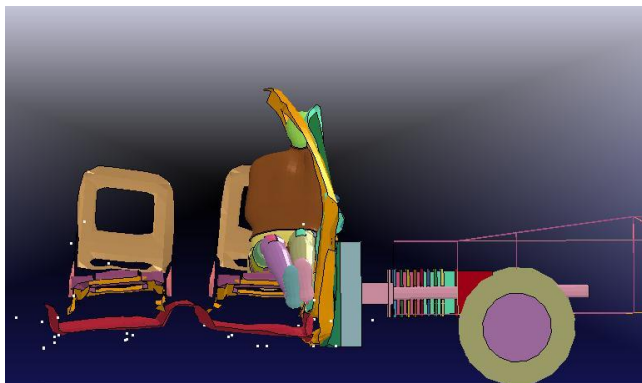
$t=0.07s$



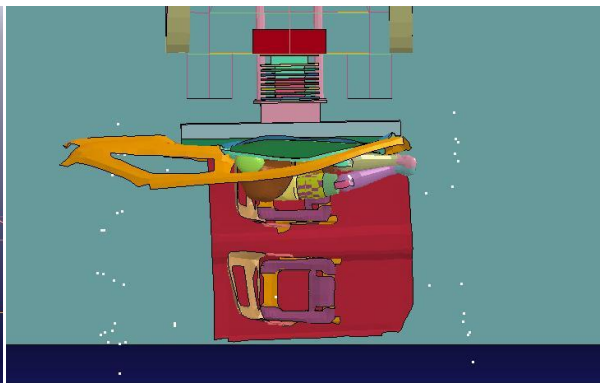
$t=0.07s$



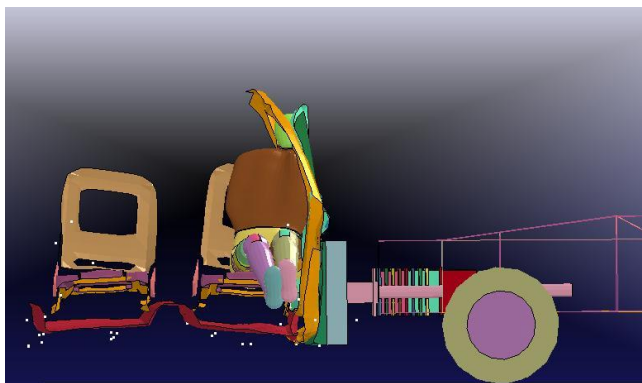
$t=0.08s$



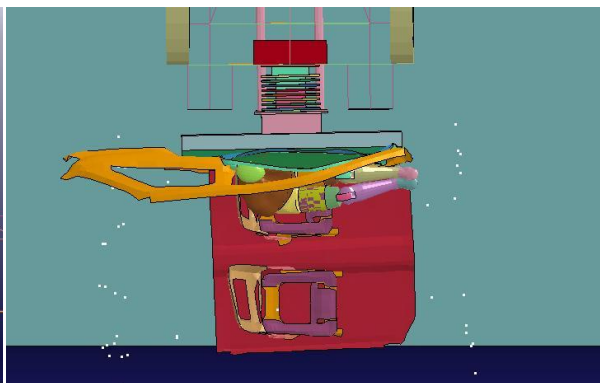
$t=0.08s$



$t=0.09s$



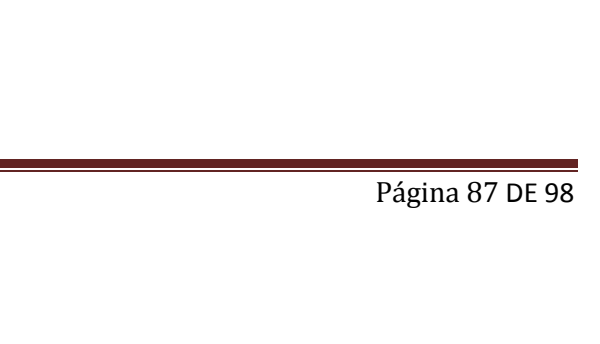
$t=0.09s$

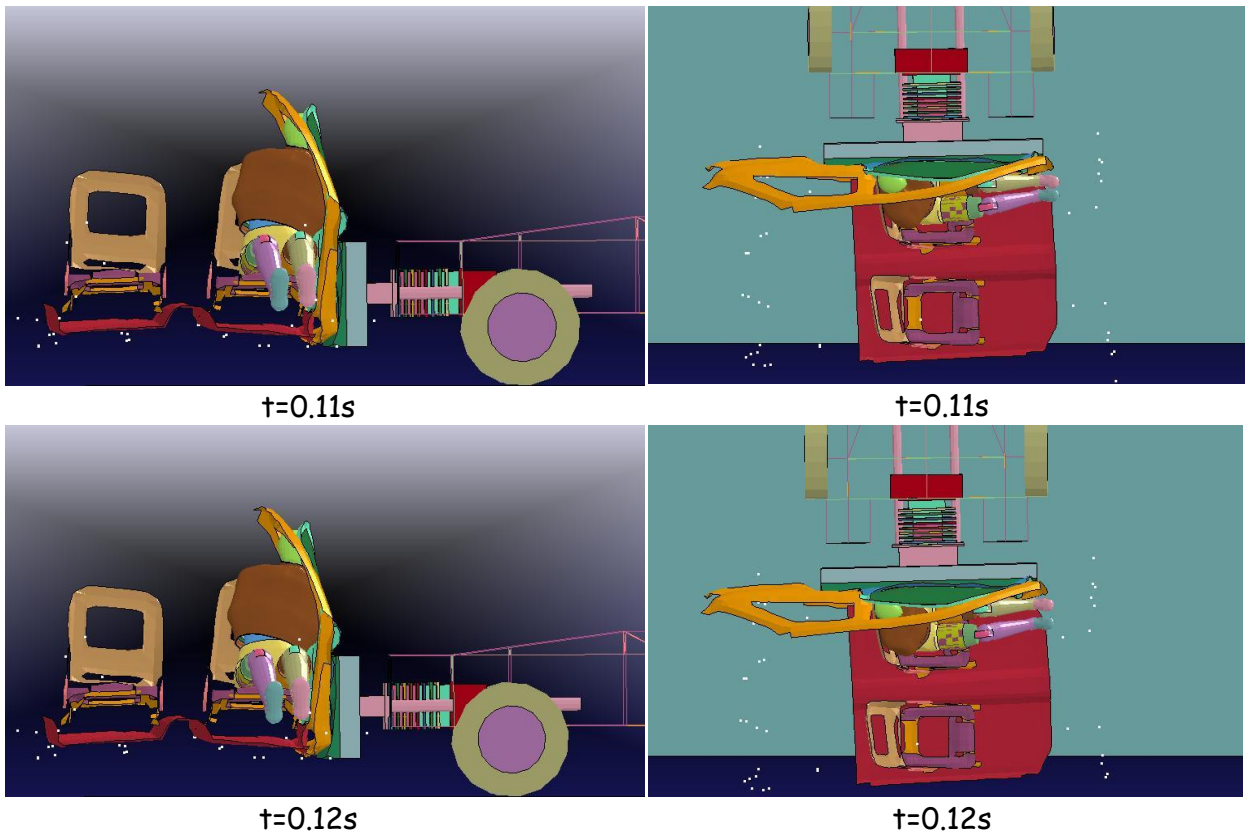


$t=0.10s$



$t=0.10s$





Como se puede observar, el *dummy* sufre un impacto en varias zonas del cuerpo, siendo las más graves o severas las producidas en la cabeza. Aunque el objetivo del presente proyecto sea analizar y comparar los índices del *HIC*, no se debe olvidar que el *dummy* también sufre daños en el tórax, sínfisis púbica y costillas, y según el reglamento 95, en un ensayo de choque lateral sería necesario evaluarlos. En la figura 8.1 se observa la velocidad que llega a sufrir la cabeza del *dummy*.

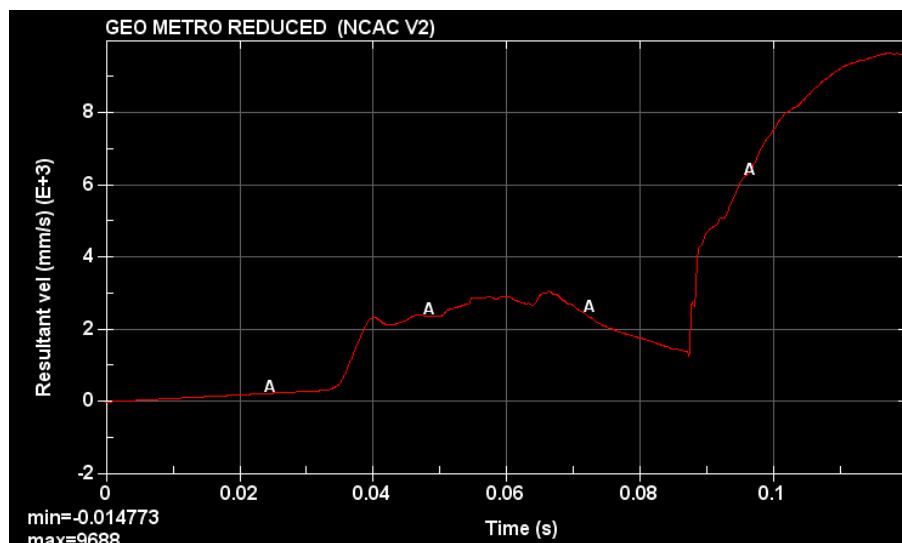


Figura 8. 1 Velocidad de la cabeza del *dummy*.

En la gráfica se observa que en el primer instante la velocidad del *dummy* es 0 ya que todavía no ha sufrido el impacto. Al final del impacto llega a alcanzar una velocidad de 34 km/h.

Se muestra en la figura 8.2 la aceleración del *dummy* durante el proceso del impacto.

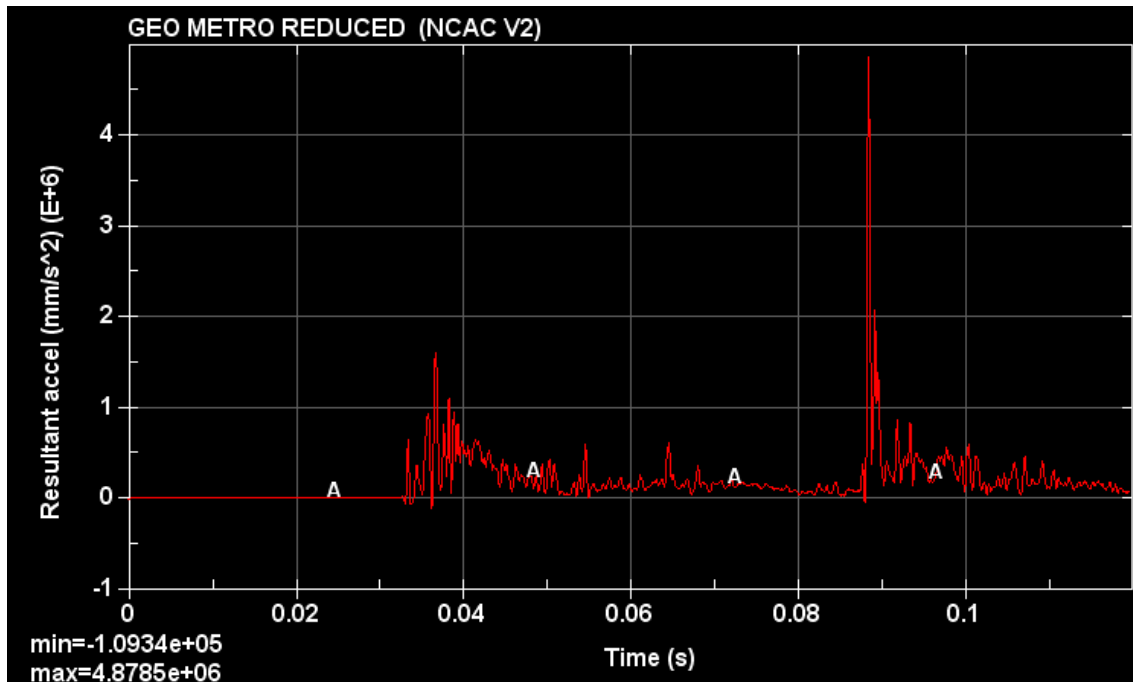


Figura 8. 2 Aceleración de la cabeza del *dummy*.

En este caso el valor de la aceleración ha sido registrado en el nodo 3043869, este nodo es el acelerómetro que se encuentra en el centro de gravedad de la cabeza. El valor máximo es de 489 g's, este valor es un valor muy alto.

En este caso, el valor registrado para el *HIC* es 1182. En la figura 8.3 se muestra la gráfica donde queda registrado dicho valor.

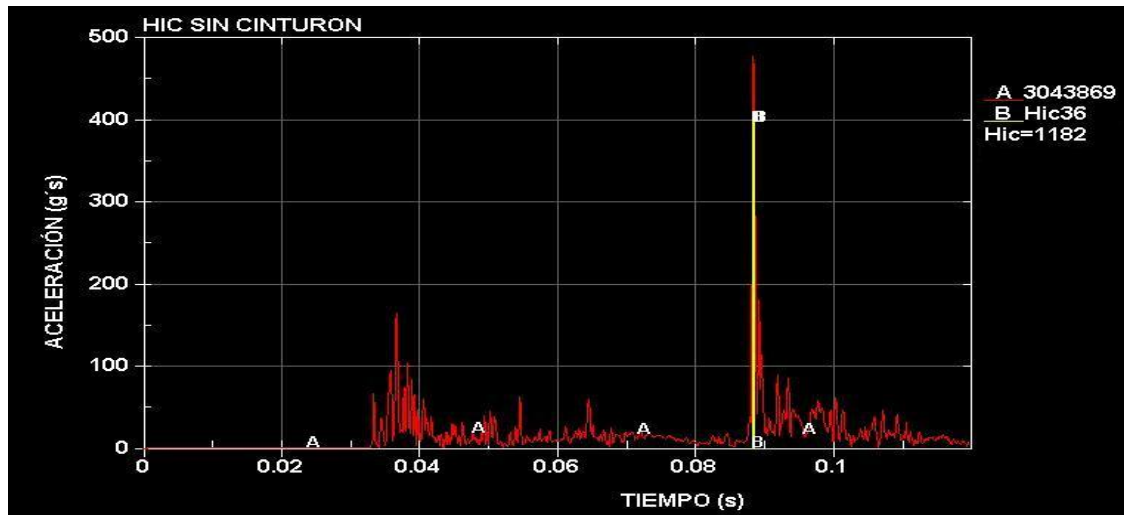


Figura 8. 3 Gráfica del HIC.

Este caso no pasaría las pruebas de homologación ya que el valor del Hic supera el valor máximo marcado por el Reglamento 95. El valor marcado por el reglamento 95 es un valor del HIC igual a 1000 mientras que este caso el valor del HIC es igual a 1182.

8.2. COMPARACIÓN ENTRE UN CASO SIN CINTURÓN Y OTRO CON CINTURÓN

Gracias a los datos aportados por el proyecto "Simulación de un choque lateral con *dummy* con cinturón mediante Ls-Dyna, se comparan los dos casos para ver el efecto del cinturón de seguridad que tiene sobre el ocupante del vehículo [3].

En las dos figuras siguientes se puede observar los valores de la aceleración medida en el centro de gravedad de la cabeza del *dummy*. En la figura 8.4 se muestra la aceleración del caso con cinturón mientras que la figura 8.5 se observa la aceleración se observa la aceleración del caso sin cinturón.

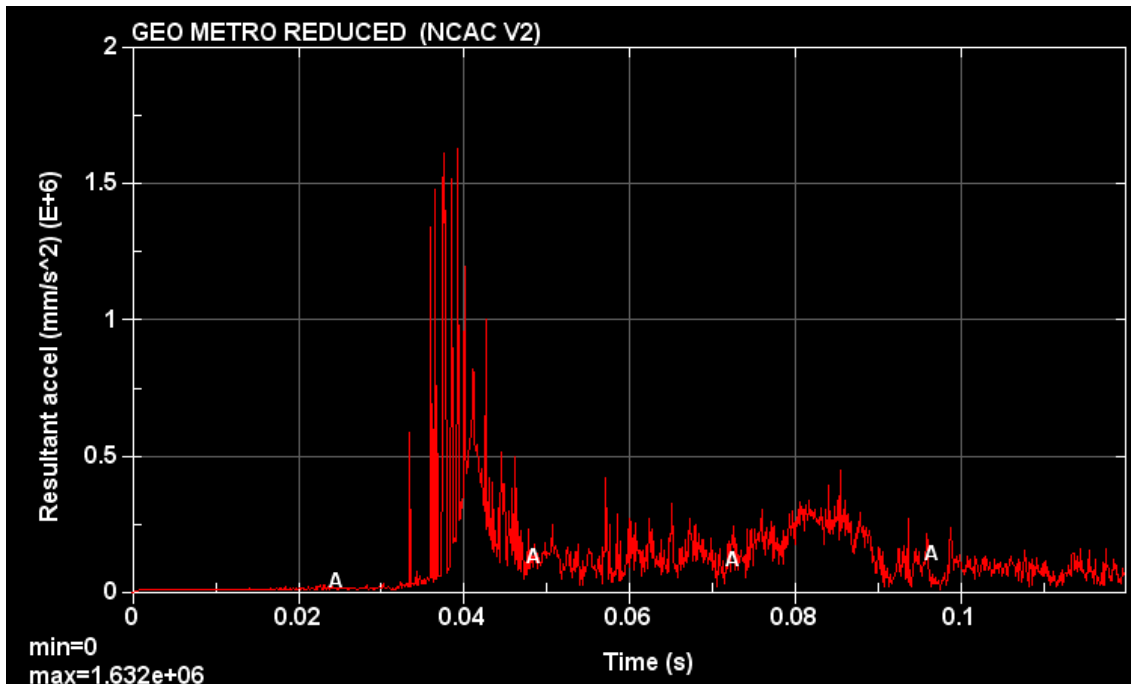


Figura 8. 4 Aceleración de la cabeza del dummy con cinturón de seguridad.

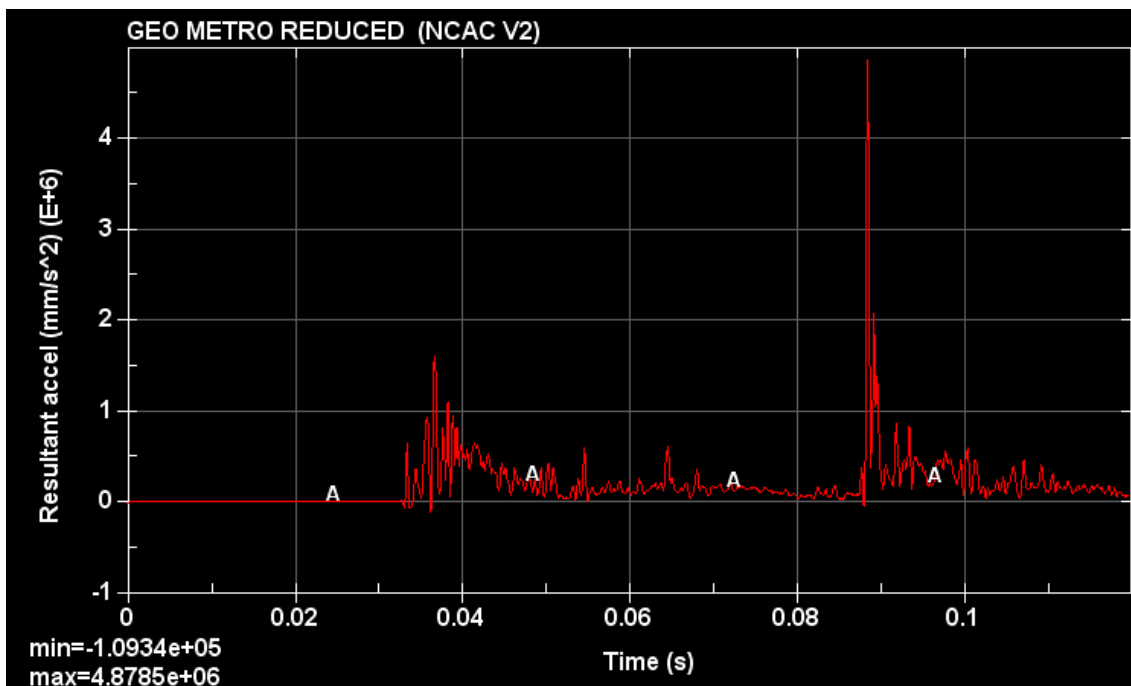


Figura 8. 5 Aceleración de la cabeza del dummy sin cinturón de seguridad.

Al comparar los dos casos se puede observar claramente una drástica reducción del valor de la aceleración. En el caso de la aceleración del caso sin cinturón se observa una aceleración máxima de 489 g's, mientras que en el caso con cinturón la aceleración máxima que se produce de 167 g's.

A la vista de estos datos se observa que la aceleración del caso sin cinturón es el triple que la aceleración del caso con cinturón.

Otro parámetro importante es el valor del HIC (HEAD INJURY CRITERION), en el caso del impacto lateral con el *dummy* con cinturón este parámetro toma un valor de 118.3 mientras que en el caso del impacto lateral con el *dummy* sin cinturón se alcanza un valor de 1182.

Las consecuencias según estos valores del HIC para el caso del *dummy* con cinturón serán un pequeño mareo y no se producirá ninguna fractura del cráneo. Según la EuroNCAP, la valoración será una calificación verde.

En el caso sin cinturón, el accidente podrá producir una gran fractura en el cráneo llegando a producir el aplastamiento del cráneo. También se podrá llegar a producir un periodo de 1 a 6 horas de inconsciencia. Este accidente podría llegar a producir la muerte del ocupante. Según la EuroNCAP, la calificación de la cabeza será roja.

9 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

9.1. CONCLUSIONES

En este proyecto se ha llevado a cabo la simulación de un accidente lateral con un *dummy* sin cinturón mediante la utilización de los programas Ls-PrePost y Ls-Dyna. La simulación ha sido llevada a cabo para comprobar los daños que se producen en este tipo de accidentes y compararlos con una simulación donde el *dummy* se encuentra con un cinturón de seguridad.

Se ha aumentado la dificultad del cálculo computacional incluyendo en la simulación tres modelos independientes como son el *bogie*, el *dummy* y el coche a estudiar. Estos tres modelos han sido desarrollados por la NCAC. La dificultad del caso ha sido la asignación de valores a las condiciones de contorno como el contacto entre las partes que chocan.

Las conclusiones a las que se llega tras la simulación y la comparación de los datos obtenidos en ellas es la importancia vital del cinturón de seguridad en los

accidentes laterales. Para comprobar la eficacia se ha comparado el parámetro HIC en los dos casos.

Para el caso de la simulación del accidente lateral con el *dummy* sin cinturón se obtiene un HIC con valor de 1183 mientras que en el caso con cinturón se ha reducido a 118.3. En el caso sin cinturón las consecuencias serían la posible pérdida de consciencia durante el periodo de una a seis horas mientras que en la simulación en el caso con cinturón no tendrá ninguna consecuencia grave.

Se observa claramente una drástica reducción del valor del HIC. Para el valor de HIC superior a 1000 se produce un aplastamiento del cráneo, pudiendo llegar a causar la muerte del ocupante del vehículo, mientras que para el valor del HIC registrado para el caso sin cinturón el efecto más grande que se puede producir es un pequeño mareo.

Finalmente el vehículo para el caso sin cinturón no pasará la prueba de homologación ya que el valor del HIC es superior a 1000.

9.2. TRABAJOS FUTUROS

Tras la realización de este proyecto se abren nuevas vías de investigación entre las que están la mejora de esta simulación o el desarrollo de nuevos modelos a partir de este proyecto.

En el apartado de mejora, se pueden incluir airbags laterales o de cortina para observar el efecto que tendría sobre la cabeza del *dummy*. Otra mejora sería optimizar los valores que se agina a los parámetros del contacto entre todas las partes que colisionan.

Otro ensayo que podría ser llevado a cabo es las variaciones de velocidad del carro deformable o la inclinación del carro deformable y comparar los diferentes valores que se obtienen en estos diferentes casos con los datos obtenidos en este proyecto.

En el desarrollo de nuevos modelos, se pueden simular otros ensayos de choque como podría ser el vuelco, un alcance trasero, el ensayo lateral contra un poste. En la figura 9.1 se observa este ensayo simulado por ordenador.



Figura 9. 1 Ensayo contra un poste.

Todas las simulaciones que han sido realizadas sólo han sido llevadas a cabo con un vehículo y han chocado contra barreras o contra carros deformables. Una nueva línea sería hacer un impacto frontal y lateral entre dos vehículos. Otra prueba que se podría realizar es esta misma prueba pero con coches de diferentes décadas para ver el comportamiento entre los diferentes vehículos.

Por último también se podrían hacer pruebas de atropellos a *dummy* para comprobar las heridas que sufre el *dummy* según diferentes velocidades e inclinaciones del vehículo.

10 REFERENCIAS

1. "Anuario estadístico de la DGT" www.dgt.es (Septiembre de 2011)
2. "Livermore Software Technology Corporation" www.lstc.com (Septiembre de 2011)
3. "Simulación de un choque lateral con *dummy* con cinturón mediante Ls-Dyna" A. Alejandro Carrero Muñoz Octubre 2011.
4. "National Crash Analysis Center" <http://www.ncac.gwu.edu> (Julio de 2011)
5. "Seguridad Activa y Pasiva del Vehículo"
<http://www.cea-online.es/reportajes/seguridad.asp> (Septiembre 2011)
6. "Sistemas de seguridad activa: Sistemas de frenos ABS"
<http://www.etp.uda.cl/areas/electromecanica/MODULOS%20%20TERCERO/SEGURIDAD%20Y%20CONFORTABILIDAD/Guia%20N%C2%BA%205%20Seguridad%20ABS.pdf> (Septiembre de 2011)
7. "Seguridad Activa"
<http://www.dgt.es/revista/num150/pages/seguridadactiva.html>
(Septiembre de 2011)
8. "Go to the Dark Side With BMW Night Vision"
<http://www.wired.com/autopia/2009/10/bmw-night-vision/> (Septiembre de 2011)
9. "How Cruise Control Systems Work"
<http://auto.howstuffworks.com/cruise-control3.htm> (Septiembre de 2011)

10. "Sistemas de control de tracción"
http://www.bosch-esperience.com/es/es/language1/traction_control_system_tcs.html
(Septiembre de 2011)
11. "Seguridad pasiva. Elementos básicos"
<http://www.todomecanica.com/seguridad-pasiva-componentes-basicos.html> (Septiembre de 2011)
12. "El habitáculo con toda Seguridad" http://www.psa-peugeot-citroen.com/es/revista/revista_doss_c1.php?id=56 (Septiembre de 2011)
13. "Seguridad automovilística"
<http://www.nextautomotivesafety.com/seguridad.html> (Septiembre de 2011)
14. "Lesiones por cinturón de seguridad"
<http://www.reeme.arizona.edu/materials/Lesiones%20por%20Cintur%C3%B3n%20de%20Seguridad.pdf> (Septiembre de 2011)
15. "Seguridad vial: El airbag" Instituto de investigación sobre reparación de vehículos - Editorial centro Zaragoza, 2ª Edición, 2003.
16. "Crash test luces y sombras"
<http://www.diariomotor.com/2008/06/15/crash-test-luces-y-sombras/>
(Septiembre de 2011)
17. "El habitáculo de seguridad" Instituto de investigación sobre reparación de vehículos - Editorial centro Zaragoza, 2ª Edición, 2003.
18. "Bridget Driscoll: *first person to be killed in a motor accident*"
www.wardsbookofdays.com/17august.htm (Septiembre de 2011)
19. "European New Car Assessment Programme, EuroNCAP" - www.euroncap.com (Septiembre de 2011)
20. "Dummy: Historia de un salvavidas"
<http://anabelherrera.wordpress.com/2009/05/01/dummies-historias-de-un-salvavidas/> (Septiembre de 2011)
21. "Una Introducción al método de los elementos finitos"
<http://www.ehu.es/~mepvaarf/rnupde/femelipticos.pdf> (Septiembre de 2011)
22. "El método de los elementos finitos: Las bases" O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor = Editorial CIMNE, 5 Edición, 2004.
23. "LS-DYNA Keyword User`s Manual, version 970" Livermore Software Technology Corporation, Abril 2003
24. www.ls-dyna.com (Septiembre de 2011)

25. "Simulación de un choque frontal de un vehículo automóvil contra diferentes tipos de barrera" David Illescas Pérez Octubre de 2009
26. " Estudio del Efecto del Cinturón de Seguridad y del Airbag en el Ocupante de un Vehículo en Caso de Colisión" Manuel Moriche Guerrero Julio de 2008
27. "Modelado de diferentes tipos de cinturones de seguridad y estudio de su efecto en caso de colisión frontal mediante LS-Dyna" Jaime Martin Pérez Septiembre de 2011.
28. "Contact Types" <http://www.dynasupport.com/tutorial/contact-modeling-in-ls-dyna/contact-types> (Septiembre de 2011)